

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ANÁLISE AUTOMÁTICA DE NORMAS
APLICADA EM PROJETO GEOMÉTRICO DE
SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**

Rômulo Luiz Pereira Ribeiro

Belo Horizonte

2018

Rômulo Luiz Pereira Ribeiro

**ANÁLISE AUTOMÁTICA DE NORMAS APLICADA
EM PROJETO GEOMÉTRICO DE
SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Prof. Nilson Tadeu Ramos Nunes, Ph.D.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Franco Porto.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

R484a

Ribeiro, Rômulo Luiz Pereira.

Análise automática de normas aplicada em projeto geométrico de superestrutura ferroviária [manuscrito] / Rômulo Luiz Pereira Ribeiro. – 2018.

xii, 103 f., enc.: il.

Orientador: Nilson Tadeu Ramos Nunes.

Coorientador: Marcelo Franco Porto.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 96-103.

1. Engenharia de transportes - Teses. 2. Ferrovias - Projetos e construção - Teses. 3. Transporte ferroviário - Teses. 4. Modelagem de informação da construção - Teses. I. Nunes, Nilson Tadeu Ramos. II. Porto, Marcelo Franco. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 629(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE AUTOMÁTICA DE NORMAS APLICADA EM PROJETO GEOMÉTRICO DE SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA

RÔMULO LUIZ PEREIRA RIBEIRO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES.

Aprovada em 26 de março de 2018, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Nilson Tadeu Ramos Nunes - Orientador
UFMG

Prof(a). Marcelo Franco Porto
UFMG

Prof(a). José Ricardo Queiroz Franco
UFMG

Prof(a). Jisela Aparecida Santanna Greco
UFMG

Belo Horizonte, 26 de março de 2018.

RESUMO

A checagem da conformidade de um projeto em relação aos textos normativos que o regulamentam geralmente é feita de forma manual, utilizando diversos recursos de trabalho, como tempo e mão de obra especializada. Este estudo propõe o desenvolvimento de uma metodologia para a realização da análise de normas computacionalmente automatizada em projeto geométrico de superestrutura ferroviária, e também propõe a implementação dessa metodologia em um protótipo computacional integrado ao AutoCAD Civil 3D associado à tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) para infraestrutura. Esse sistema será útil tanto para o profissional responsável pelo projeto quanto para a entidade governamental responsável pela análise e aprovação do projeto. Ambos terão acesso ao ferramental computacional que servirá para o desenvolvimento do projeto em ambiente BIM, no qual as instruções técnicas, formulações e adequações estarão disponíveis no momento do desenvolvimento e da aprovação dos projetos. A pesquisa é conduzida pelo *Design Science Research* através da estrutura proposta por March e Storey (2008) que consiste na identificação do problema, evidenciando que não existe uma solução adequada, desenvolvimento de um artefato para resolver o problema, avaliação do artefato produzido e exposição da contribuição prática e científica que a pesquisa e o artefato proporcionam. A metodologia elaborada para a realização da análise automática de normas consiste em comparar os valores dos parâmetros de projetos com os valores normativos e com valores calculados através de formulações consagradas pela literatura da área. Após os cálculos são exibidos relatórios de resultados para que o usuário possa identificar quais parâmetros estão de acordo com os critérios normativos e quais parâmetros estão em desacordo com as normas. O protótipo desenvolvido foi avaliado realizando uma checagem de normas em um trecho de 10 km da Ferrovia Centro-Atlântica. Os resultados demonstram que o método proposto para verificação automática de normas está adequado a seus propósitos, proporcionando checagens rápidas e confiáveis, estando apto a ser utilizado para a revisão e aprovação de novos projetos ferroviários. Esta pesquisa contribui para o progresso dos objetivos de desenvolvimento do transporte ferroviário no Brasil e também representa o progresso no desenvolvimento e na aplicação de conceitos BIM na construção de modelos específicos para projetos ferroviários, onde foram propostos novos métodos e ferramentas para verificação automática de normas, mostrando uma nova maneira de automatizar o processo de desenvolvimento, verificação e aprovação de projetos ferroviários com a aplicação e os benefícios das novas tecnologias.

ABSTRACT

Checking the conformity of a project with the normative texts that regulate it is generally done manually, using a variety of work resources, such as time and skilled labor. This study proposes the development of a methodology to perform computationally automated standards analysis in the geometric design of railway superstructure, and also proposes the implementation of this methodology in a computer system integrated to AutoCAD Civil 3D associated with BIM (Building Information Modeling) technology infrastructure. This system will be useful both for the professional responsible for the project and for the governmental entity responsible for the analysis and approval of the project, both will have access to the computational tool that will be used for the development of the project in a BIM environment, in which technical instructions, formulations and adjustments will be available at the moment of development and approval of the projects. The research is conducted by Design Science Research through the structure proposed by March and Storey (2008), which consists of identifying the problem, showing that there is no adequate solution, developing an artifact to solve the problem, evaluating the artifact produced and exposing of the practical and scientific contribution that research and artifact provide. The methodology developed for performing the automatic analysis of standards consists in comparing the values of the project parameters with the normative values and with values calculated through formulations established by the area literature. After the calculations, results reports are displayed so that the user can identify which parameters comply with the normative criteria and which parameters are in disagreement with the standards. The developed system was evaluated by performing a standards check on a 10 km stretch of the Centro-Atlântica Railway. The results demonstrate that the proposed method for automatic verification of standards is adequate for its purposes, providing fast and reliable checks, being able to be used for the revision and approval of new railway projects. This research contributes to the progress of the railway development objectives in Brazil and also represents progress in the development and application of BIM concepts in the construction of specific models for railway projects, where new methods and tools for automatic verification of standards, showing a new way of automating the process of development, verification and approval of railway projects with the application and benefits of new technologies.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	TEMA DE PESQUISA	1
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	2
1.4	JUSTIFICATIVA	2
1.5	RESULTADOS ESPERADOS	3
1.6	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	3
1.7	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	HISTÓRIA DAS FERROVIAS.....	5
2.1.1	<i>Histórico no brasil</i>	6
2.2	INTRODUÇÃO A FERROVIA	6
2.2.1	<i>Classificação dos trens e das linhas</i>	11
2.2.2	<i>Bitola (Gauge)</i>	11
2.2.3	<i>Projeto geométrico ferroviário</i>	12
2.2.4	<i>Esforços atuantes no movimento do material rodante</i>	13
2.2.5	<i>Curvas horizontais</i>	18
2.2.6	<i>Curvas de transição</i>	27
2.2.7	<i>Curvas verticais</i>	28
2.2.8	<i>Acidentes ferroviários</i>	28
2.3	NORMAS, MANUAIS E INSTRUÇÕES.....	29

2.3.1	<i>DNIT</i>	29
2.3.2	<i>VALEC</i>	30
2.3.3	<i>CBTU</i>	32
2.3.4	<i>AREMA</i>	33
2.4	TECNOLOGIA COMPUTACIONAL PARA REALIZAÇÃO DE <i>CODE-CHECKING</i>	35
2.4.1	<i>Code-Checking</i>	35
2.4.2	<i>Code Checking em projetos ferroviários</i>	40
2.4.3	<i>BIM</i>	41
2.4.4	<i>CAD</i>	43
2.4.5	<i>AutoCAD Civil 3D</i>	43
2.4.6	<i>Programação</i>	44
3	METODOLOGIA E MÉTODOS	46
3.1	UTILIZAÇÃO DO DESIGN SCIENCE RESEARCH.....	51
3.2	METODOLOGIA PARA O TRABALHO.....	54
3.3	MÉTODO DO TRABALHO PARA CRIAÇÃO DO ARTEFATO.....	56
3.4	METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DO CODE-CHECKING.....	57
3.4.1	<i>Determinação do tipo de análise</i>	59
3.4.2	<i>Entrada de dados</i>	60
3.4.3	<i>Interpretação dos dados</i>	62
3.4.4	<i>Execução da checagem</i>	62
3.4.5	<i>Exibição dos resultados</i>	65
4	DESENVOLVIMENTO	66
4.1	ACESSO A API DO CIVIL 3D.....	66
4.2	PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA.....	68

4.3	SÍNTESE DO PROTÓTIPO.....	69
4.4	DETERMINAÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE.....	70
4.4.1	<i>Criação e alteração de normas</i>	72
4.5	ENTRADA DE DADOS	74
4.5.1	<i>Dados da composição</i>	75
4.5.2	<i>Dados do perfil do trilho</i>	76
4.5.3	<i>Dados da linha férrea</i>	76
4.5.4	<i>Escolha do alinhamento</i>	77
4.6	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E EXECUÇÃO DA CHECAGEM	78
4.6.1	<i>Curvas horizontais</i>	79
4.6.2	<i>Curva de transição</i>	80
4.6.3	<i>Tangente horizontal</i>	80
4.6.4	<i>Tangente vertical e curvas verticais</i>	80
4.7	EXIBIÇÃO DOS RESULTADOS	81
4.8	CONTRIBUIÇÕES ADICIONAIS NÃO TRATADAS PELAS VERSÕES COMERCIAIS ANALISADAS	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	90
6	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Elementos de uma ferrovia (Brina, 1988).....	7
Figura 2.2: Perfil trilho Vignole (Adaptado de DNIT, 2015c).....	10
Figura 2.3: Bitola da via	11
Figura 2.4: Taxa de dormentação no Brasil (Machado <i>et al</i> , 2009)	17
Figura 3.1: Classificação da pesquisa.....	47
Figura 3.2: Natureza da pesquisa.....	47
Figura 3.3: Objetivos de pesquisa.....	48
Figura 3.4: Abordagem da pesquisa	49
Figura 3.5: Métodos Científicos	49
Figura 3.6: Métodos de pesquisa	51
Figura 3.7: Classificação da pesquisa.....	55
Figura 3.8: Estrutura do Design Science Research para o trabalho.....	55
Figura 3.9: Método de trabalho	56
Figura 3.10: Metodologia para realização do Code-Checking	58
Figura 4.1: Criação de janelas através do Microsoft Visual Studio	68
Figura 4.2: Entrada de dados	70
Figura 4.3: Parâmetros para análise.....	71
Figura 4.4: Edição de normas - Tangente.....	72
Figura 4.5: Edição de normas – Curva Horizontal	73
Figura 4.6: Edição de normas – Curva Vertical	73

Figura 4.7: Edição de normas - Transição	74
Figura 4.8: Etapa da entrada de dados	74
Figura 4.9: Entrada de dados da composição	75
Figura 4.10: Edição do perfil metálico do trilho	76
Figura 4.11: Edição dos dados da linha férrea.....	77
Figura 4.12: Seleção do alinhamento	78
Figura 4.13: Resultados – Tabela consolidada	81
Figura 4.14: <i>Tooltip</i> sobre o erro em um elemento	81
Figura 4.15: Resultados – Tabela individual	82
Figura 4.16: Comparação de funcionalidades entre programas e protótipo	83
Figura 5.1: Alinhamento analisado.....	85
Figura 5.2: Estacas do alinhamento	86
Figura 5.3: Preenchimento dos dados de entrada	88
Figura 5.4: Velocidade máxima em cada curva	89
Figura 5.5: Mensagem de alerta na entidade 24.	89
Figura 5.6: Resultado da análise em curvas verticais	90
Figura 5.7: Mensagem de erro na entidade 58.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BIM - *Building Information Modeling*

Civil 3D – AutoCAD Civil 3D

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

CAD – *Computer Aided Design*

DSR – *Design Science Research*

AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*

CBTU - Companhia Brasileira de Trens Urbanos

PIL – Programa de Investimentos em Logística

ISF – Instruções de Serviços Ferroviários

INPF - Instituto Nacional de Pesquisas Ferroviárias

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

UIC – *International Union of Railways*

AAR – *Association of American Railroads*

IT – Instrução Técnica

FCA – Ferrovia Centro-Atlântica

IFC – *Industry Foundation Classes*

API – *Application programming interface*

PIV – Ponto de Interseção Vertical

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão descritos os pontos principais desta pesquisa, iniciando com o tema, seguido da contextualização do assunto a ser tratado, objetivos, justificativa, resultados esperados, limitações do trabalho, sendo mostrada ainda a estrutura da dissertação.

1.1 Tema de pesquisa

O tema deste trabalho é a realização da checagem de normas em projeto geométrico de superestrutura ferroviária de forma automatizada em um ambiente computacional. A análise automática de normas tem como propósito responder se um determinado projeto está em concordância com as especificações impostas pelas normas que o regulamentam. Por ser feita de forma automática, há redução no tempo de execução da checagem e diminuição da probabilidade de erros e violações de conformidade, tanto em estágios iniciais quanto no projeto final, reduzindo o retrabalho e consequentemente o custo final do projeto (Salama e El-Gohary, 2013).

1.2 Contextualização

Na maioria das vezes, os projetos de engenharia são regidos por textos regulamentadores (normas construtivas) especificados por diversos agentes – desde clientes até instituições regulamentadoras. Esses textos especificam algumas características do projeto, além de exigências básicas em relação à segurança, conforto, padrões, entre outros. A checagem da conformidade de um projeto em relação aos textos que o regulamentam geralmente é feita de forma manual, utilizando diversos recursos de trabalho, como tempo e mão de obra especializada, com maiores chances de erros e retrabalho, tendo como consequência o aumento no custo total do projeto (Salama e El-Gohary, 2013; Tan, Hammad e Fazio, 2010). Com isso, surge a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que auxiliem neste processo de verificação (Luo e Gong, 2015).

Para a boa implementação das técnicas de análise automática de normas é necessário o estudo sobre o *Building Information Modeling* (BIM), que é uma tecnologia com a capacidade de armazenar, analisar, gerenciar e compartilhar todos os dados de um projeto durante todo o seu ciclo de vida, e também o estudo sobre o sistema automático de *Code Checking*, que, segundo Eastman *et al.* (2009), é um sistema que permite analisar as informações de um

determinado projeto, sem alterar qualquer aspecto deste, apresentando resultados qualitativos como “aprovado” ou “reprovado”.

1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo geral do trabalho tem o caráter de resolução do problema de pesquisa e os objetivos secundários são etapas importantes para que o objetivo geral seja alcançado. A seguir são apresentados o objetivo geral e os específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Elaborar uma metodologia para aplicação computacional da análise automática de normas em projetos de geometria de superestrutura ferroviária em ambiente BIM, para que se obtenha o aumento da eficiência e eficácia na análise/checagem de norma desses projetos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir um conjunto de normas e regras a serem consideradas para a análise automática;
- Definir um padrão de interface homem-máquina para interação do usuário com o modelo 3D no ambiente BIM;
- Desenvolver um protótipo computacional que implemente a metodologia elaborada;
- Realizar testes e análises da metodologia proposta utilizando o protótipo computacional em um modelo real.

1.4 Justificativa

A checagem dos elementos de projeto pode ser feita de forma manual, porém ela fica exposta a erros, análises subjetivas e consome muito tempo de um profissional qualificado. Uma checagem computacionalmente automatizada pode contribuir com uma verificação rápida e eficaz dos elementos normativos que guiam o desenvolvimento dos projetos, de forma que os avaliadores de projeto possam, em tempo reduzido, avaliar e aprovar o projeto, com o retorno de toda formulação matemática aplicada aos cálculos.

Em argumentações sobre as ações preliminares ao início das obras ferroviárias, Santos (2012) propõe a melhoria dos processos de análises por meio da engenharia simultânea e com o uso de ferramentas de gerenciamento de projetos. Além disso, ele sugere o aprofundamento da pesquisa em relação a propostas de melhoria em cada etapa específica das ações

preliminares. Dessa forma, esta pesquisa se concentra na etapa do projeto geométrico de superestrutura ferroviária, propondo um método para análise automática da conformidade desses projetos em relação às normas que o regulamentam.

1.5 Resultados esperados

Esta pesquisa contribui com uma metodologia para a elaboração e aprovação dos projetos geométricos de superestrutura ferroviária. A metodologia deve permitir maior rigor para supervisionar os parâmetros de segurança e conforto dos projetos. Esses parâmetros também podem ser usados na otimização dos processos de tomada de decisão. Espera-se que a análise das normas ocorra de forma rápida e eficiente, adequando-se aos tipos de projetos e podendo ser implementada para essa finalidade para revisão e aprovação de novos projetos ferroviários.

Com a metodologia e o protótipo para análise de norma desenvolvidos neste trabalho, os responsáveis técnicos pela elaboração do projeto terão um ferramental computacional para desenvolvimento do projeto em ambiente BIM, no qual as instruções técnicas, formulações e adequações estarão disponíveis no momento do desenvolvimento, auxiliando o projetista sobre quais medidas devem ser adotadas em cada situação do projeto, exaurindo as opções a serem analisadas em cada caso. O mesmo ferramental estará disponível para que os profissionais técnicos dos órgãos avaliadores do Estado (como ANTT, DNIT, etc.) possam validar as medidas tomadas pelos projetistas, com ganho de tempo, eficiência e eficácia na avaliação e aprovação dos projetos.

Espera-se que o produto deste trabalho seja utilizado pelos engenheiros responsáveis pelo projeto ferroviário e pelos órgãos governamentais responsáveis pela análise e aprovação do projeto, gerando maior agilidade na aprovação, de forma que as obras ferroviárias possam ser construídas na maior brevidade, sem paralisações e custos adicionais devidos a erros técnicos.

1.6 Limitações do trabalho

Esse trabalho não contempla as normas específicas para projetos ferroviários de outros países (considera apenas algumas especificações da AREMA), além disso, não é capaz de analisar a geometria de ferrovias de alta velocidade, pois estas necessitam da checagem de diversos parâmetros não incluídos na análise dos trens de baixa velocidade.

1.7 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos:

- O primeiro capítulo é a introdução deste trabalho, onde foi apresentado o tema da pesquisa, os objetivos, uma breve introdução do que será tratado nessa pesquisa;
- O segundo capítulo trata da revisão da literatura que explica todos os conceitos necessários para o entendimento do trabalho, com foco para a ferrovia, BIM, *Code-Checking*, programação e estudos análogos;
- O terceiro capítulo mostra a metodologia empregada para executar a pesquisa e a metodologia elaborada para a realização da análise automática de normas;
- O quarto capítulo mostra o desenvolvimento do protótipo computacional, que é a materialização da metodologia criada neste trabalho;
- O quinto capítulo mostra uma aplicação do protótipo elaborado, onde um trecho de ferrovia real é analisado, mostra também os resultados dessa aplicação e a discussão desses resultados;
- O sexto capítulo é a conclusão deste trabalho, mostrando os fatos mais relevantes que são fruto dessa pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura deste trabalho aborda os conceitos sobre os elementos da ferrovia, além de mostrar a situação atual da ferrovia no Brasil. Por fim, há uma breve revisão sobre a tecnologia computacional necessária para criação do trabalho, a qual se resume em: *Code-Checking*, CAD, BIM, e alguns elementos de programação.

2.1 História das ferrovias

A palavra ferrovia é uma tradução do termo em inglês *railway*, sugerindo inicialmente a junção ferro+via, ou uma estrada de ferro. Porém, o conceito básico de uma *railway* é uma estrada com trilhos para orientar os veículos, de forma que estes não deixem de seguir o caminho definido pelos trilhos (Lewis, 2001). Então, ferrovia pode ser considerada como qualquer caminho feito por trilhos, de ferro ou de outro material, que guie os veículos que por ela sigam. As primeiras ferrovias da história foram desenvolvidas com objetivos específicos conforme será mostrado, no entanto, o objetivo principal que levou ao desenvolvimento das ferrovias foi o transporte de cargas pesadas.

O transporte sobre trilhos pode ser dividido em duas categorias: da era pré-vapor e era do vapor. Na era pré-vapor os trilhos eram feitos de madeira ou de pedra com tração humana ou animal, tendo origem na antiga Grécia e também Roma. Estudos sugerem que a primeira ferrovia foi construída em meados do ano de 600 A.C na antiga Grécia, com o nome de *Diolkos wagonway*. Essa ferrovia tinha aproximadamente 6 km, seus trilhos eram de pedra e a tração era humana, e o seu objetivo era transportar barcos do Golfo de *Corinthe* ao *Saronic Gulf* (Lewis, 2001). Hoje esse trecho foi substituído por um canal, porém a solução mais viável para a época foi a construção dessa ferrovia.

Ainda na era pré-vapor temos a ferrovia funicular *Reisszug*, a qual se comportava como um elevador, sendo feita para transportar objetos em rampas de grande inclinação, utilizando para isso um sistema de cordas para tracionar o veículo. A ferrovia de *Reisszug* foi construída aproximadamente no ano de 1500 D.C na Áustria, com o objetivo de transportar objetos para um castelo situado em uma colina, possuindo inclinação máxima de 65% e sendo feita com trilhos de madeira e tração humana. Essa ferrovia funciona até hoje, porém com trilhos de aço e cabos de aço tracionados por um motor elétrico. Até 1804, o ano em que a primeira locomotiva com tração a vapor foi desenvolvida, outras ferrovias foram construídas utilizando trilhos de

madeira e tração animal/humana, com o objetivo de transportar carvão das minas. (Tzanakakis, 2013)

A era do vapor tem início em 1804, quando o engenheiro inglês Richard Trevithick conseguiu desenvolver uma locomotiva a vapor capaz de puxar cinco vagões em um trilho de ferro fundido à velocidade de 8 km/h. Com esse feito, o estudo na área ocorreu de forma mais intensa e os avanços resultaram nas ferrovias que conhecemos hoje (Nabais, 2014).

2.1.1 Histórico no Brasil

O surgimento das ferrovias no Brasil foi motivado pela lei promulgada em 1850 que proibia o tráfico internacional de escravos para o Brasil. Essa lei causou a escassez de escravos no país, o que fez com que os fazendeiros reivindicassem uma ferrovia para o escoamento de suas mercadorias, pois antes esse trabalho era feito por escravos. A primeira ferrovia brasileira foi a Estrada de Ferro Mauá, inaugurada em 1854, com apenas 14,5 km (Nabais, 2014).

Em 1958, a malha ferroviária brasileira atingia a sua maior extensão, totalizando 37.967 km, porém atualmente possui uma extensão de 30.576 km sendo 7.492 km na bitola larga, 23.027 km na bitola métrica e 510 km em bitola mista (ANTT, 2018).

Para possibilitar que o transporte ferroviário seja uma alternativa de logística no Brasil, o governo brasileiro, em agosto de 2012, lançou o Programa de Investimento em Logística (PIL), prevendo investimentos de R\$ 99,6 bilhões em construção e/ou melhoria de 11 mil km de linhas ferroviárias. Em junho de 2015, depois de adicionar 1088 km em linhas ferroviárias, o governo brasileiro anunciou novamente um investimento de R\$ 86,4 bilhões em investimentos no setor ferroviário, planejando aumentar sua rede em pouco mais de 7500 km de linha ferroviária. O investimento conta principalmente com a criação da ferrovia transcontinental com extensão estimada em 3.500 km, e com a criação de dois trechos da ferrovia norte-sul com extensão estimada em 2.325 km, além da ligação entre MT e PA e a ligação de RJ a ES (ANTT, 2017).

2.2 Introdução a ferrovia

Uma ferrovia tem por objetivo guiar os trens com segurança e controle, suportando os esforços produzidos por estes e oferecendo o menor atrito possível no contato entre as rodas dos trens e o trilho, de forma a obter um transporte altamente econômico. Os trens são guiados pelo contato roda-trilho, que consegue manter o material rodante sobre os trilhos através de

uma simples aderência (Rosa, 2011). Para a perfeita harmonia entre os elementos da via e do material rodante, vários detalhes devem ser seguidos no projeto, atendendo a critérios de segurança, economia e conforto.

Um trem é constituído pelo material de tração (locomotiva e carros motores) e pelo material de transporte (vagões ou carros) ficando ambos apoiados em um sistema chamado de truque, que consiste em estruturas rígidas com dois ou mais eixos de rodas, as quais possibilitam a rotação do material rodante em relação ao trilho com o objetivo de facilitar a inscrição dos veículos na curva, causando o menor desgaste possível (Rosa, 2011).

As estradas de ferro são compostas por dois sistemas, a superestrutura e a infraestrutura. A infraestrutura é constituída pela terraplanagem e por todas as obras situadas abaixo do greide da terraplanagem. A superestrutura, também chamada de via permanente, é formada principalmente pelo sublastro, lastro, dormentes, trilhos e acessórios (adaptado de Brina, 1988).

A via permanente está sujeita à ação de desgaste das rodas dos veículos e das intempéries, e deve ser renovada quando seu desgaste atingir o limite de tolerância exigido pela segurança ou comodidade da circulação (adaptado de Brina, 1988). A Figura 2.1 mostra a seção típica de uma ferrovia, indicando seus principais elementos.

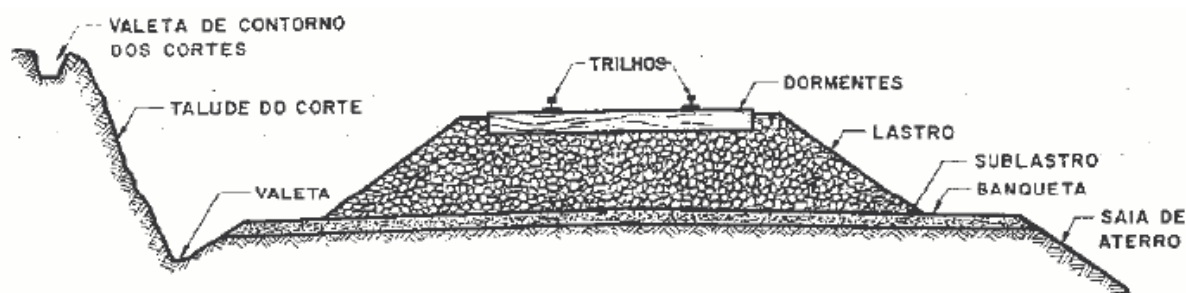


Figura 2.1: Elementos de uma ferrovia (Brina, 1988)

As dimensões do leito da estrada de ferro são fixadas por normas e dependem da bitola utilizada. A escolha da bitola depende de um estudo técnico e econômico. Após a construção da ferrovia, o tipo escolhido para a bitola impede que as composições com bitolas diferentes trafeguem pela via.

- Sublastro (*Sub-Ballast*)

O sublastro é uma camada de material granular regularmente distribuído que completa a plataforma ferroviária e que recebe o lastro. Sua função é distribuir a carga proveniente do lastro sobre a plataforma, aumentando a capacidade de suporte desta e tornando possível a diminuição da altura do lastro. Além disso, ele proporciona o aumento da resistência do leito à erosão, melhora a capacidade de drenagem da via, evita a ascensão de finos da plataforma para o lastro e também a penetração de agregados do lastro na plataforma (adaptado de DNIT, 2015a; Cabral, 2005; Brina, 1988).

- Lastro (*Ballast*)

Lastro é uma camada de material situada entre os dormentes e o sublastro. Sua função é distribuir uniformemente a carga recebida pelos dormentes, de forma que a plataforma receba uma tensão de trabalho uniforme e reduzida. Além disso, ele forma uma superfície contínua para os dormentes, a qual possibilita manter o nível e o alinhamento do trilho por meio do nivelamento e socaria, impede o deslocamento dos dormentes, mantém os dormentes em sua posição correta, aumenta a capacidade de drenagem da superestrutura, forma um suporte elástico com capacidade limitada para atenuar as trepidações e choques gerados pelo material rodante, dificulta a capilaridade e o crescimento da vegetação na plataforma. Para plataforma rígida de concreto armado é dispensável o uso de lastro (Adaptado de DNIT, 2015a; Cabral, 2005; Brina, 1988; Machado *et al*, 2009; Chandra e Agarwal, 2007).

- Dormente (*Sleepers*)

Os dormentes são os elementos em que os trilhos são fixados, sendo sua função principal servir de suporte aos trilhos, transmitindo sua carga para o lastro. Além disso, permitem a fixação do trilho de forma que a distância entre esses se mantenha constante, sendo essa distância denominada de bitola. Os dormentes mantêm a estabilidade vertical e horizontal da via e também garantem o nivelamento dos trilhos. (Adaptado de DNIT, 2015b; Brina, 1988; Machado *et al*, 2009; Chandra e Agarwal, 2007)

Os dormentes mais utilizados são os de madeira e os de concreto (DNIT, 2015b), porém pode-se utilizar também os dormentes de aço e de materiais alternativos (Machado *et al*, 2009). Nas vias com plataforma rígida poderá ser dispensada a aplicação de dormente, desde que justificada tecnicamente. O intervalo mínimo entre dormentes é de 25 cm, salvo para as juntas

apoiadas, e o espaçamento máximo varia de acordo com a classe da via, sendo 60 cm para a classe I, 65 cm para a classe II e 71 cm para a classe III (DNIT, 2015b).

- Trilhos (*Rail*)

Os trilhos são responsáveis por guiar e dar sustentação ao material rodante, sendo considerados o principal elemento de suporte. Detêm o maior custo entre os elementos da superestrutura ferroviária (Machado *et al*, 2009) e atuam como uma viga contínua, transferindo a solicitação do material rodante para os dormentes. O trilho é colocado inclinado de 1:20 sobre a vertical, para oferecer uma superfície de rolamento levemente “boleada”, com intenção de reduzir o desgaste do trilho e do material rodante (DNIT, 2015b).

A forma dos trilhos evoluíram gradativamente (Brina, 1988) e hoje o perfil utilizado em trilhos de ferrovias convencionais é do tipo Vignole (Macêdo, 2009). Esse tipo de trilho é composto por três partes: boleto, alma e patim, sendo produzido em comprimentos padrão de 12, 18 e 24 metros. Sua designação ocorre pelo peso do metro linear, sendo os mais comuns: TR-37, 45, 50, 57 e 68 (DNIT, 2015b). Cada perfil de trilho tem atributos importantes que são usados nos cálculos do projeto geométrico, a saber:

- Altura total (A)
- Base (B)
- Boleto (C)
- Alma (D)
- Área (Ae)
- Momento de inércia (I_x)
- Peso por metro linear (P)
- Módulo de resistência à flexão do boleto (W_{bol})
- Módulo de resistência à flexão do patim (W_{pat})

A Figura 2.2 mostra como é a seção típica do trilho Vignole:

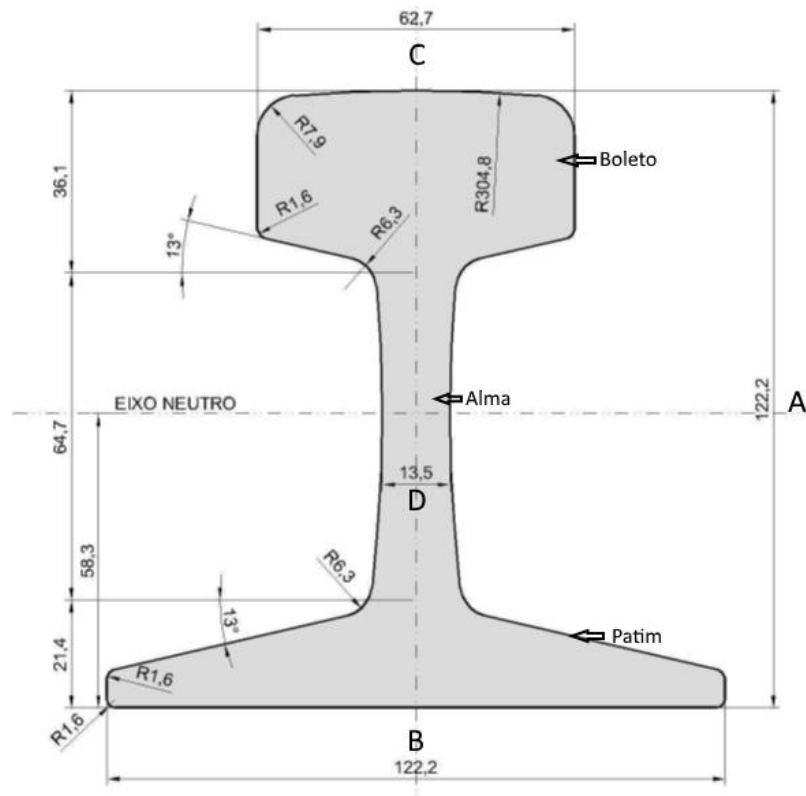


Figura 2.2: Perfil trilho Vignole (Adaptado de DNIT, 2015c)

O peso por metro linear do trilho tem relação com os esforços verticais suportados e com o desgaste admissível em seu boleto. A escolha do trilho empregado depende das cargas, velocidade e tráfego da via (Machado *et al*, 2009).

O contato roda-trilho produz desgaste no trilho, o que, com o tempo, pode deixá-lo inutilizável (Macêdo, 2009). Devido ao atrito dos frisos das rodas, nas curvas ocorre o desgaste dos trilhos por atrito, e nas estradas de ferro de transporte pesado esse tipo de desgaste é a principal causa da substituição frequente dos trilhos (Brina, 1988). Em geral, o desgaste por atrito é função do raio da curva, da carga por eixo, da manutenção da linha e da manutenção dos vagões. Para cargas por eixo maiores e para raios de curva pequenos tem-se um maior desgaste (Cabral, 2005).

2.2.1 Classificação dos trens e das linhas

Os trens podem ser classificados em cargueiros, de passageiros, mistos e de serviço. Os trens de carga são compostos por vagões de carga, que podem estar carregados ou descarregados. Nesse tipo de trem apenas os parâmetros de segurança devem ser atendidos. Os trens de passageiros transportam pessoas, então, além dos parâmetros de segurança, deve-se atender os parâmetros de conforto. Os trens mistos transportam tanto carga quanto passageiros e portanto eles devem seguir ambos os parâmetros (Nabais, 2014).

2.2.2 Bitola (*Gauge*)

Denomina-se bitola a distância entre as faces internas das duas filas de trilhos, medida a 12 mm abaixo do plano de rodagem, conforme a Figura 2.3.



Figura 2.3: Bitola da via

A escolha da bitola deve ser analisada para cada ferrovia e escolhida por meio de um estudo técnico e econômico, visando adotar a solução mais eficaz. (Adaptado de Brina, 1988). As bitolas devem seguir um padrão para que um número maior de tipos de composições consigam rodar na mesma via férrea. No Brasil as principais bitolas adotadas são:

- Bitola métrica ou curta (1,00m)
- Bitola larga (1,60m)
- Bitola mista (três trilhos que recriam a bitola larga e a curta)

Nota-se que a bitola métrica possui um percentual muito maior em relação às outras. Esse fato é explicado quando se observam as vantagens e desvantagens da adoção da bitola métrica.

Segundo Brina (1988), as principais vantagens ao se adotar a bitola métrica são:

- Curvas de menor raio;
- Menor largura da plataforma, terraplenos e obras;
- Economia de lastro, dormentes e trilhos;
- Material rodante mais barato;
- Menor resistência à tração;
- Economia nas obras de arte;
- Custo inicial muito menor.

As principais desvantagens são:

- Menor capacidade de tráfego;
- Menor velocidade;
- Necessidade de baldeação nos entroncamentos com outras bitolas.

Apesar de teoricamente apresentar menor capacidade de tráfego, nota-se que há estradas de ferro com bitola métrica com maior produtividade do que muitas de bitola larga, isso devido à capacidade de carga dos vagões e dos trilhos. Os vagões de bitola larga apresentam maior volume, porém possuem maior peso próprio, dessa forma, a capacidade máxima de carga da bitola larga não é aproveitada, visto que há um limite para carga máxima por roda do vagão, fato que explica o maior uso da bitola métrica no Brasil (Adaptado de Brina, 1988).

2.2.3 Projeto geométrico ferroviário

A geometria de uma via férrea é composta por tangentes e curvas. As curvas necessitam de uma atenção especial nos projetos, pois, quando seus elementos estão em desacordo com as normas, sérios problemas podem ocorrer na circulação dos trens. Segundo Brina (1988), as curvas devem ser projetadas para que a via seja estabelecida de modo a proporcionar as melhores condições possíveis de segurança e conforto na circulação. A principal diferença entre os aspectos de ferrovias e rodovias é a superelevação, que é muito distinta devido à grande diferença entre os veículos de projeto (Paz e Oliveira, 2015). Segundo Porto (2004), as ferrovias têm exigências mais severas quanto às características das curvas do que as rodovias devido à aderência nas rampas, à solidariedade rodas-eixo e ao paralelismo dos eixos de mesmo truque, que impõem a necessidade de raios mínimos maiores do que os raios encontrados em rodovias.

O projeto geométrico deve adotar premissas construtivas e operacionais que garantam uma estrada eficiente e segura (Paz e Oliveira, 2015). O material rodante que circula em um trecho ferroviário pode variar ao longo do dia, pois trens de carga carregados possuem maior carga por eixo e trafegam em velocidades reduzidas, trens de cargas descarregados possuem carga por eixo menor mas podem alcançar velocidades maiores e trens de passageiros podem alcançar velocidades muito superiores aos trens de carga.

Vários tipos de composições podem utilizar o mesmo trecho ferroviário. Como a velocidade dos carros e a carga por eixo são características que variam em cada composição, essas características têm interferência significativa no equilíbrio do conjunto. Dessa forma, o projeto geométrico de um trecho deve ser desenvolvido para atender determinados tipos de composições, e as composições que não se enquadrarem não poderão circular no trecho em questão.

2.2.4 Esforços atuantes no movimento do material rodante

Para realizar o dimensionamento dos elementos do projeto geométrico ferroviário é necessário conhecer todos os esforços que atuam sobre a via férrea. A via está sujeita a diferentes esforços quando uma locomotiva se movimenta sobre ela e, em geral, esses esforços são considerados segundo seu ângulo de atuação com base na direção dos trilhos (Esveld, 2001):

- Esforços verticais;
- Esforços transversais;
- Esforços longitudinais.

Esses esforços são distribuídos de forma desigual nos dois trilhos e são difíceis de serem quantificados (Esveld, 2001). Para transformar as cargas estáticas em cargas dinâmicas, multiplica-se a carga estática por um coeficiente dinâmico, que será descrito adiante.

2.2.4.1 Esforços verticais

Segundo (Brina, 1988) os esforços verticais são originados pelos seguintes motivos:

- Carga estática do veículo - é o peso do veículo parado;
- Força centrífuga vertical - causada por massas excêntricas do material rodante quando estiver em curva;

- Movimento de galope, trepidação ou balanço - ocorre quando o material rodante passa por irregularidades da via ou juntas defeituosas;
- Repartição desigual do peso nas curvas - ocorre quando o material rodante percorre uma curva com velocidade maior ou menor do que a prevista para o cálculo da superelevação;
- Defeitos na linha ou no material rodante.

2.2.4.2 Esforços transversais

Segundo (Brina, 1988) os esforços transversais são originados por estes motivos:

- Força centrífuga - ocorre nas curvas quando a força centrífuga não é totalmente compensada pela superelevação;
- Movimento de *lacêt* - ocorre nas retas devido a irregularidade na via ou defeitos no material rodante;
- Vento.

2.2.4.3 Esforços longitudinais

Segundo (Brina, 1988) os esforços longitudinais são originados por estes motivos:

- Dilatação - ocorre pela variação de temperatura;
- Movimento de reptação - ocorre quando as rodas passam pelos trilhos e criam uma deformação elástica;
- Golpes das rodas nos topos dos trilhos - ocorrem quando a roda passa por juntas defeituosas;
- Esforço trator - é o atrito estático.

2.2.4.4 Coeficiente dinâmico

Para realizar os cálculos de momento fletor nos trilhos, deve-se considerar as cargas dinâmicas e não-estáticas (Brina, 1988). Como as cargas dinâmicas são de difícil obtenção, utiliza-se um coeficiente empírico, que multiplica a carga estática com o objetivo de transformá-la em carga dinâmica, resultando no coeficiente dinâmico (C_d), cujo valor varia muito em diversos experimentos.

Esse coeficiente tem relação direta com o padrão da via, visto que em vias de padrão superior o coeficiente dinâmico possui valores menores que nas vias de padrão inferior.

A AREMA utiliza a Equação 1 para determinar o valor do coeficiente dinâmico:

$$C_d = 1 + \frac{v^2}{30000} \quad (1)$$

Os valores obtidos para o coeficiente dinâmico através dessa fórmula são muito pequenos, pois essa fórmula é utilizada para vias de alto padrão. Segundo Brina (1988), para vias de padrão médio ou inferior o mais prudente é utilizar um coeficiente dinâmico entre 1,3 e 1,4.

2.2.4.5 Momento máximo atuante

Para cálculo do momento máximo atuante no trilho tem-se várias teorias, sendo a mais simples a de Winkler, que considera os apoios rígidos. Em resumo, o momento máximo é calculado pela Equação 2:

$$M_{m\acute{a}x} = 0,1875 * P * C_d * a \quad (2)$$

Onde:

P = carga estática por roda (kgf)

C_d = coeficiente dinâmico

a = distância de eixo a eixo dos dormentes (m)

Um método que se aproxima mais da realidade é o Método de Zimmermann simplificado, o qual considera os apoios elásticos. Esse método possui duas hipóteses: a primeira considera a flexibilidade da linha, em que a influência de uma carga desaparece em poucos vãos do dormente, sendo a carga aplicada no meio do vão entre dormentes; a segunda hipótese considera a elasticidade da via, na qual o recalque do dormente é proporcional à pressão unitária do contato entre o dormente e o lastro, sendo a carga aplicada em cima do dormente.

Para efetuar o cálculo do momento máximo atuante é necessário utilizar o coeficiente de superestrutura (γ), que é calculado a partir da Equação 3:

$$\gamma = 6 * \frac{EI}{D * a^3} \quad (3)$$

Onde:

D = coeficiente de dormente (kgf/cm)

E = módulo de elasticidade do trilho (kgf/cm²)

I = módulo de inércia do trilho (cm⁴)

a = distância entre dormentes (cm)

O coeficiente de superestrutura é adimensional e necessita do coeficiente de dormente para seu cálculo, sendo obtido através da Equação 4:

$$D = 0,9 * C * b * c \quad (4)$$

Onde:

C = coeficiente de lastro (kgf/cm³)

b = largura do dormente (cm)

c = faixa de socaria (cm)

O coeficiente de lastro é determinado experimentalmente e varia de acordo com a qualidade do lastro. Para linhas de padrão alto será adotado o valor de quinze e para linhas de baixo padrão o valor de cinco.

Para a primeira hipótese, o momento máximo obtido é dado pela Equação 5:

$$M_{\max} = \frac{(7 + 8\gamma)}{8 \cdot (5 + 2\gamma)} \cdot P \cdot C_d \cdot a \quad (5)$$

Para a segunda hipótese pela Equação 6:

$$M_{\max} = \frac{\gamma}{2 + 3\gamma} \cdot P \cdot C_d \cdot a \quad (6)$$

Onde:

γ = coeficiente de superestrutura

P = carga estática por roda (kgf)

C_d = coeficiente dinâmico

a = distância de eixo a eixo dos dormentes (m)

O momento adotado é o maior encontrado nas duas hipóteses.

2.2.4.6 Escolha do trilho

Para determinar o trilho a ser utilizado é necessário conhecer o momento máximo (M_{max}) atuante nos trilhos e a tensão admissível (σ_{adm}). Segundo Brina (1988), a tensão admissível deve ser fixada em 1500 kgf/cm² para levar em conta a imprecisão do cálculo dos momentos, as sobrecargas a que os trilhos podem estar sujeitos e os desgastes que diminuam o seu momento de inércia. Para determinar o momento máximo atuante deve-se adotar inicialmente um trilho de referência, visto que é necessário utilizar o módulo de inércia do perfil do trilho para o cálculo do coeficiente de superestrutura, que é um passo para a determinação do momento máximo atuante. Dessa forma deve-se escolher inicialmente um perfil entre os padrões de trilhos fabricados e por fim verificar se o módulo resistente (W) do trilho satisfaz à relação $\frac{M_{max}}{W} \leq \sigma_{adm}$.

2.2.4.7 Definição da taxa de dormentação

Segundo Machado *et al* (2009), a taxa de dormentação comum no Brasil varia de 1640 a 1850 dormentes por quilômetro, conforme a Figura 2.4:

FERROVIA	BITOLA	ESPÉCIE DORMENTE COMUM	TAXA DE DORMENTE POR KM	DISTÂNCIA ENTRE OS EIXOS DOS DORMENTES
EFVM	Métrica / Larga	Madeira	1850	540 mm
EFVM	Métrica	Aço	1650 / 1820	600 / 550* mm
FCA	Métrica / Larga	Madeira	1750	570 mm
FCA	Métrica	Concreto	1640	610 mm
EFC	Larga	Madeira	1850	540 mm
EFC	Larga	Aço	1640	610 mm
EFC	Larga	Concreto	1640	610 mm

Figura 2.4: Taxa de dormentação no Brasil (Machado *et al*, 2009)

A taxa de dormentação pode ser determinada em conjunto com o perfil do trilho, de forma que os custos finais sejam os menores possíveis, garantindo a segurança da via. A distância entre dormentes é o inverso da taxa de dormentação.

2.2.5 Curvas horizontais

Uma curva horizontal traz condições diferentes à circulação do material rodante, novos esforços aparecem e é necessária a adequação das características da via para que a passagem dos trens mantenha as condições de segurança e conforto.

Sabe-se por intermédio da mecânica que todo corpo ao percorrer uma trajetória curva está sujeito a uma força, chamada centrífuga. No caso de um veículo percorrendo uma trajetória circular de raio R, o mesmo estaria sujeito a uma força centrífuga dada pela Equação 7 (Brina, 1988):

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \quad (7)$$

Em resumo, as curvas exigem que a força centrífuga seja amenizada com uma superelevação. Além disso, para que os truques ferroviários consigam percorrer a curva sem forças do atrito com os boletos do trilho, será necessária uma superlargura na via, devendo-se também determinar o raio mínimo da curva para que o trem passe com segurança.

2.2.5.1 Força centrífuga e superelevação

Em uma via ferroviária estabelecida num plano horizontal, a força centrífuga deslocará o veículo no sentido do trilho externo, provocando neste um forte atrito através dos frisos das rodas. Se a grandeza da força centrífuga exceder um certo limite, poderá ocorrer o tombamento do veículo (Brina, 1988).

Para contrabalancear o efeito nocivo da força centrífuga, inclina-se a via ferroviária de um ângulo α , elevando o trilho externo da curva, por meio da inclinação do dormente, de modo a criar uma componente que equilibre a força centrífuga. A maior altura do trilho externo em relação ao interno é o que se denomina de superelevação do trilho (Brina, 1988).

“A superelevação é um desnível transversal aplicado ao pavimento que possibilita a força peso compensar a ação da força centrífuga ao inscrever o movimento do veículo em um trecho circular, podendo ser aplicada a rodovias ou ferrovias” (Paz e Oliveira, 2015).

A superelevação teórica é aquela calculada através da Equação 8 e tem essa denominação por ser apenas uma referência, pois não considera a variação de velocidade dos trens na linha, assumindo uma única velocidade de projeto:

$$h_t = \frac{BV^2}{127 * R} \quad (8)$$

Onde:

h_t = superelevação teórica (m)

B = distância de centro a centro dos trilhos (m)

V = velocidade (km/h)

R = raio da curva (m)

Devido aos diferentes tipos de composição na ferrovia, deve-se calcular uma superelevação que atenda a todos os casos. Dessa forma o valor teórico, que considera apenas a velocidade máxima, nunca é utilizado e serve apenas como base para os cálculos.

Segundo Paz e Oliveira (2015), a superelevação teórica é a maior superelevação calculada e a escolha dos métodos de cálculos para grandes raios é irrelevante, visto que seus valores são bem próximos. Além disso, o método racional apresenta grande divergência dos métodos empíricos, apresentando comportamento inverso aos outros. Os métodos empíricos resultam em mais superelevações dentro da faixa de valores recomendados.

Há dois critérios para o cálculo da superelevação prática:

- Critério da segurança;
- Critério do conforto.

1. Critério de segurança

O critério de segurança considera que a superelevação não equilibrará toda a força centrífuga, porém ele garante a estabilidade através de um coeficiente de segurança, de forma que a superelevação prática seja um pouco menor que a teórica, tornando possível que trens

lentos passem com segurança pela curva sem correrem risco de tombar para dentro da curva (adaptado de Brina, 1988).

A superelevação prática com base no critério de segurança é calculada através da Equação 9:

$$h_p = h_t - \frac{B}{H*n} * \left(\frac{B}{2} - d \right) \quad (9)$$

Onde:

h_p = superelevação prática (m)

h_t = superelevação teórica (m)

H = altura do centro de gravidade do veículo em relação aos trilhos (m)

B = distância de centro a centro dos trilhos (m)

n = coeficiente de segurança adotado como 5

d = deslocamento do centro de gravidade adotado como 0,10 (m)

2. Critério do conforto

Esse critério garante que a aceleração centrífuga não-equilibrada não cause desconforto aos passageiros. A aceleração centrífuga não-equilibrada chama-se aceleração centrífuga ativa (γ), possuindo valores diferentes para cada bitola. Para este trabalho serão adotados (adaptado de Brina, 1988):

$$\gamma_{max} = 0,65 \text{ para bitola larga}$$

$$\gamma_{max} = 0,55 \text{ para bitola métrica}$$

A superelevação prática com base no critério de conforto é calculada através da Equação 10:

$$h_p = h_t - \frac{B*\gamma_{max}}{g} \quad (10)$$

Onde:

h_p = superelevação prática (m)

h_t = superelevação teórica (m)

B = distância de centro a centro dos trilhos (m)

g = gravidade (m/s²)

3. Superelevação adotada

Calculada a superelevação para uma determinada curva de raio R, pelos dois critérios, ter-se-á que adotar o valor de h_p que satisfaça aos dois critérios, isto é, o maior dos dois valores encontrados (Brina, 1988).

2.2.5.2 Raio

As curvas devem possuir um raio adequado para o tráfego dos trens na via. Os raios mínimos devem atender a critérios como prevenção de escorregamento da roda externa, de inscrição do veículo e de velocidade máxima na via.

1. Raio mínimo para evitar escorregamento da roda externa

O raio mínimo para que não haja escorregamento da roda externa é calculado pela Equação 11 (Brina, 1988):

$$R_{min} (Escorregamento) = \frac{20 * r * b}{j + S} \quad (11)$$

Onde:

R = raio mínimo dado (m)

r = raio da roda (m)

b = bitola (m)

j = jogo da via na reta dado (m)

S = superlargura (m)

O jogo da via é obtido através da seguinte Equação 12:

$$j = b - d \quad (12)$$

Onde:

b = bitola (m)

f = distância entre faces externas dos frisos das rodas em metros

d = jogo da via (m)

2. Raio mínimo para inscrição limite

Os frisos das rodas extremas dos truques de dois eixos estão em permanente contato com os trilhos, criando um atrito que vai aumentar a resistência à curva. Esse tipo de inscrição não poderá ser aceito normalmente, pois facilitaria o descarrilamento na curva. O raio mínimo para garantir a inscrição é calculado através da Equação 13 (Brina, 1988):

$$R_{min} (\text{Inscrição limite}) = \frac{p * \sqrt[2]{D * m}}{S + j} \quad (13)$$

Onde:

p = base rígida do veículo (m) - medida de centro a centro das áreas de contato das rodas sobre os trilhos

D = diâmetro da roda (m) - medido até o friso

m = altura do friso (m)

S = superlargura (m)

j = jogo da via (m)

3. Raio mínimo para inscrição intermediária

Caso existam eixos intermediários, a inscrição limite não é possível. Poderá ocorrer uma situação intermediária de inscrição, admitindo-se que o alinhamento dos frisos das rodas do lado interno tangencie o trilho. Para esse caso o raio mínimo é calculado através da Equação 14 (Brina, 1988):

$$R_{min} (\text{Inscrição Intermediária}) = \frac{(p + 2 * \sqrt[2]{D * m})^2}{8 * (S + j)} \quad (14)$$

Onde:

p = base rígida do veículo em (m) - medida de centro a centro das áreas de contato das rodas sobre os trilhos

D = diâmetro da roda (m) - medido até o friso

m = altura do friso (m)

S = superlargura (m)

j = jogo da via (m)

4. Raio mínimo inscrição livre

No caso da inscrição livre, o eixo traseiro do veículo tomará a posição radial, isto é, tomará a direção do raio da curva (fato confirmado experimentalmente). O raio mínimo para esse caso é dado pela Equação 15 (Brina, 1988):

$$R_{min} (Inscrição Livre) = \frac{p^2 - 2 * p * \sqrt{D * m}}{2 * (S + j)} \quad (15)$$

Onde:

p = base rígida do veículo (m) - medida de centro a centro das áreas de contato das rodas sobre os trilhos

D = diâmetro da roda (m) - medido até o friso

m = altura do friso (m)

S = superlargura (m)

j = jogo da via (m)

5. Raio mínimo devido a velocidade máxima da via

O raio mínimo devido a velocidade máxima da via segue a Equação 16 (Brina, 1988):

$$R_{min} (Velocidade) = \frac{7.865 * V^2 * B}{1000 * h_{max} + B * \frac{\gamma_{max}}{9.81}} \quad (16)$$

Onde:

V = velocidade (km/h)

B = superlargura (m)

h_{max} = superelevação máxima (m)

γ_{max} = aceleração centrífuga não-equilibrada (m/s²)

2.2.5.3 Velocidade limite máxima

A velocidade máxima com que um trem pode percorrer uma curva é função do raio da curva, da superelevação e superlargura dada à mesma. Essa velocidade denomina-se velocidade limite. Para determinar a velocidade máxima deve-se considerar o critério de segurança e o critério de conforto (adaptado de Brina, 1988):

1. Critério de segurança

Para o critério de segurança a velocidade máxima é dada pela Equação 17 (Brina, 1988):

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{127\left(\frac{h_p}{B} + \frac{\frac{B-d}{2}}{H*n}\right)} * \sqrt{R} \quad (17)$$

Onde:

V_{max} = velocidade máxima (km/h)

h_p = superelevação adotada (m)

B = superlargura (m)

d = deslocamento do centro de gravidade adotado como 0,10 (m)

R = raio da curva (m)

H = altura do centro de gravidade do veículo em relação aos trilhos (m)

n = coeficiente de segurança adotado como 5

2. Critério de conforto

Para o critério de conforto a velocidade máxima é dada pela Equação 18 (Brina, 1988):

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{127\left(\frac{h_p + B * \frac{\gamma_{max}}{9,81}}{B}\right)} * \sqrt{R} \quad (18)$$

Onde:

V_{max} = velocidade máxima (km/h)

h_p = superelevação adotada (m)

B : superlargura (m)

R : raio da curva (m)

γ_{max} : aceleração centrífuga não-equilibrada (m/s²)

2.2.5.4 Velocidade mínima dos trens de carga que trafegam na mesma via dos trens de passageiros

A superelevação teórica foi calculada com base na velocidade máxima dos trens que percorrem a via. Mesmo com a redução decorrente da superelevação prática, os trens de baixa velocidade podem estar sujeitos a tombamento e a descarrilamentos para o lado externo das curvas devido à superelevação acima da máxima permitida para sua velocidade, assim, há

necessidade de restringir um valor mínimo para os trens de carga, que é dada pela Equação 19 (Brina, 1988):

$$V_{mín} = \sqrt{127 \left(\frac{h_p}{B} - \frac{\frac{B}{2} - d}{(H + h_p)n} \right) * \sqrt{R}} \quad (19)$$

Onde:

V_{max} = velocidade máxima (km/h)

h_p = superelevação adotada (m)

H = altura do centro de gravidade do veículo em relação aos trilhos (m)

B = superlargura (m)

d = deslocamento do centro de gravidade adotado como 0,10 (m)

R = raio da curva (m)

n = coeficiente de segurança adotado como 5

2.2.5.5 Sobrecarga nas curvas

As Normas Técnicas para as Estradas de Ferro Brasileiras estabelecem que “a resultante das forças que atuam sobre os veículos deverá ficar contida no terço médio central da bitola, tanto para o trem mais rápido quanto para o trem parado sobre a curva (Brina, 1988).

A excentricidade da resultante é calculada através da Equação 20:

$$x = H \left(\frac{V^2}{127 * R} - \frac{h_p}{B} \right) + d \quad (20)$$

Com a excentricidade calculada pode-se calcular a superelevação devido à excentricidade através da Equação 21:

$$h_p = h_t - B * \frac{x - d}{H} \quad (21)$$

Onde:

V_{max} = velocidade máxima (km/h)

R = raio da curva (m)

x = excentricidade (m)

h_p = superelevação adotada (m)

H = altura do centro de gravidade do veículo em relação aos trilhos (m)

B = distância de centro a centro dos trilhos (m)

2.2.5.6 Superlargura

A superlargura é um pequeno aumento na bitola da via em trechos de curvas para possibilitar a inscrição dos veículos sem causar desgastes excessivos nas rodas e trilhos. Segundo Brina, na prática, o valor da superlargura varia de 1 a 2 cm e existem fórmulas práticas que dão a superlargura em função do raio da curva:

$$S = \frac{6}{R} - 0,012 \quad (22)$$

Onde:

S: superlargura (m), limitado a 0,02m.

R: raio da curva (m)

$$S = \frac{6000}{R} - 5 \quad (23)$$

Onde:

S: superlargura (mm)

R: raio da curva (m)

A superlargura é colocada, deslocando-se o trilho interno a fim de garantir a continuidade da curva do trilho externo, que guia as rodas dianteiras.

2.2.5.7 Contratrilhos

São trilhos ou peças laminadas que se colocam na parte interna da via, junto aos trilhos normais, e que pode ter a finalidade de impedir o descarrilamento das rodas ou conduzir as rodas, no caso de descarrilamento, de modo a afastar o veículo do local, como no caso de obras de arte (Brina, 1988).

Segundo (DNIT, 2015b), os contratrilhos devem ser empregados nas situações:

- Em pontilhões e passagem inferior de vão superior a 6m;
- Em pontes e viadutos;

- Onde exista pilar de passagem superior situado a menos de três metros de fiada de trilho mais próxima;
- Onde exista obra considerada de importância suficiente a proteger e esteja a menos de três metros da fiada de trilho mais próxima.

1. Contratrilhos para impedir o descarrilamento

Neste caso são colocados os contratrilhos internamente, a uma distância tal do trilho da via, impedindo o deslocamento transversal, quando, do outro lado, houver a tendência de o friso subir no trilho. A distância do contratrilho ao trilho é calculada através da Equação 24 (Brina, 1988):

$$\varepsilon = b + S - (c + e) \quad (24)$$

Onde:

ε = distância do contratrilho ao trilho (m)

b = bitola da via (m)

S = superlargura (m)

c = distância interna das rodas (m)

e = espessura dos frisos (m)

2. Contratrilho para guiar as rodas

Se a finalidade do contratrilho é apenas a de guiar rodas, no caso de um descarrilamento, evitando que o truque se afaste da banquetta do lastro, agravando o acidente, ele é colocado a uma distância do trilho principal, a qual dê para os aros das rodas passarem. Neste caso, a distância ε será de aproximadamente 15 cm (Brina, 1988).

2.2.6 Curvas de transição

Quando um trem passa de um trecho em tangente para um trecho em curva circular, uma mudança bruta de força centrífuga atuante ocorrerá, a qual é capaz de desestabilizar o material rodante, além de causar desconforto aos passageiros. Para evitar essa mudança bruta da força centrífuga é utilizada a curva de transição, que, além de oferecer uma passagem gradual do raio de curvatura do infinito até o raio da curva circular, também permite que a superelevação seja

alcançada de forma gradual, variando de nula até a superelevação máxima. Dessa forma, os objetivos principais das curvas de transição são de garantir uma transição suave entre o raio de curvatura, das forças centrífugas e da superelevação (Chandra e Agarwal, 2007).

O tipo de curva de transição mais utilizado é o clotóide (Brina, 1988). A definição de uma curva em clotóide é que o raio de curvatura em qualquer um de seus pontos é inversamente proporcional ao comprimento do arco nesse ponto, ou seja:

$$R * L = K^2 \quad (25)$$

Onde:

R = raio de curvatura no ponto

L = comprimento do arco até o ponto

K = parâmetro de clotóide

2.2.7 Curvas verticais

As curvas verticais têm o objetivo de suavizar a passagem de um greide para outro, evitando choques e tensões anormais, além de contribuir para a estabilidade do material rodante. A curva vertical mais utilizada é a parábola do 2º grau (Brina, 1988), por ser simples e por proporcionar uma variação de declividade constante.

Todas as parábolas de 2º grau seguem uma equação genérica:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (26)$$

Onde o eixo y corresponde à cota de um ponto.

2.2.8 Acidentes ferroviários

Os acidentes ferroviários podem ser classificados em colisões, descarrilamentos e outros. As colisões podem ser colisão frontal, colisão traseira, colisão inclinada, colisão com *buffer stop* (dispositivo utilizado para impedir que os trens avancem além do fim da linha) e colisões com obstruções na linha. Os descarrilamentos podem ser em pistas simples, em curvas ou em junções. Os outros estão relacionados a incêndio, explosões, liberação de produtos químicos, pessoas caindo dos trens e colisão do trem com pessoas na pista.

Os acidentes podem ser causados por falhas humanas, por falha de sinalização, por falha mecânica da composição, por falha da engenharia civil, por causas naturais ou por falha de pessoas externas à ferrovia. Este trabalho pode contribuir na redução de acidentes causados por falha na engenharia civil através da análise automática de normas, que garante que as composições percorram a via com as máximas velocidades e cargas dentro dos limites de segurança impostos pelas normas de projeto.

2.3 Normas, manuais e instruções

Nesta seção, serão apresentadas as normas, manuais e instruções que se aplicam ao projeto geométrico de superestrutura ferroviária, de forma que seus principais pontos sejam mostrados.

2.3.1 DNIT

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) apresenta algumas recomendações através do Instituto Nacional de Pesquisas Ferroviárias (INPF), por meio das Instruções de Serviços Ferroviários (ISF), que são documentos que abordam vários temas sobre ferrovias. Como o INPF é recente, apenas um documento disponibilizado para acesso se enquadra no tema do trabalho. Acredita-se que no futuro novas recomendações sejam elaboradas e possam ser inseridas em pesquisas futuras.

2.3.1.1 ISF 213 – Projeto de superestrutura da via permanente: Conjunto trilho e dormente

Esse documento (DNIT, 2015b) tem como objetivo definir o perfil do trilho, as dimensões e o espaçamento dos dormentes e a pressão gerada na interface dos dormentes com o lastro. O documento diz que os trilhos devem ter dureza, tenacidade, elasticidade e resistência a flexão, devendo sua escolha ser baseada na capacidade do trilho de suportar as cargas induzidas pelo movimento dos veículos ferroviários verificando as seguintes variáveis:

- Tensão admissível à flexão;
- Tensão admissível à flexão na face inferior do patim;
- Deformação máxima;
- Pressão de contato exercida pela roda na zona de rolamento do boleto do trilho.

Em relação aos dormentes, deve-se determinar seu espaçamento em função da pressão admissível no lastro. Além disso o espaçamento máximo entre eles varia de acordo com a classe da via:

- Vias Classe I – 60 cm
- Vias Classe II – 65 cm
- Vias Classe III – 71 cm
- Vias Acessórias com velocidade máxima de 30 km/h – 80 cm

2.3.2 VALEC

A VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. é uma empresa pública vinculada ao Ministério dos Transportes, com função social de construção e exploração de infraestrutura ferroviária, apresentando algumas especificações que devem ser seguidas em seus projetos.

2.3.2.1 Projeto geométrico – 80-EG-000A-17-0000

Essa especificação (VALEC, 2011a) tem como objetivo estabelecer diretrizes básicas para o projeto geométrico da linha principal e pátios de cruzamento, ditando critérios e parâmetros mínimos para o projeto geométrico. Para a planimetria são definidos:

- Raio mínimo da curva horizontal = 343,823 m ($3^{\circ}20'$);
- Curva com transição em espiral (Clotóide) para raios iguais ou inferiores a 2291,838m ($0^{\circ}30'$);
- Comprimento da transição: 1 metro para cada minuto do grau da curva ou 0,5 m quando não houver distância suficiente entre curvas;
- Tangente mínima entre curvas: 30 m.

Para a altimetria são definidos:

- Deve-se utilizar curvas verticais entre greides quando a diferença entre as rampas for igual ou superior a 0,20% ($i_1 - i_2 \geq 0,20\%$);
- Deve-se utilizar curvas parabólicas;
- Rampa máxima compensada: 0,60%, 1,00% e 1,45% (conforme as diretrizes de projeto);
- Compensação em curva: 0,06% por grau de curva;

- Quando possível deverá haver distância mínima de 2000m entre curvas verticais compostas de rampas consecutivas de sinais contrários. As curvas verticais serão calculadas com base na taxa de variação por estaca de 20 metros, de 0,033% para curvas côncavas e convexas. Para melhor condição de escoamento nos cortes em concordância convexa pode-se utilizar uma variação de 0,066%;
- O comprimento da curva vertical será calculado pela expressão a seguir e seu comprimento mínimo deve ser de 60m:

$$y = \frac{20i_1 - i_2}{\text{taxa de variação}}$$

2.3.2.2 Projeto de superestrutura – 80-EG-000A-18-0000

Essa especificação (VALEC, 2011b) tem como objetivo definir os serviços constantes do projeto de superestrutura e define alguns dados gerais que devem ser seguidos:

- Bitola: 1,60m;
- Velocidade de projeto = 80 km/h;
- Velocidade operacional = 60 km/h;
- Carga máxima por eixo = 32,5 t;
- Trilhos = TR-57.

2.3.2.3 Superelevação em curvas ferroviárias – 80-EG-000A-18-0001

Essa especificação (VALEC, 2011c) tem como objetivo fixar e estabelecer critérios para o projeto de superelevação. Em complemento a essa especificação é recomendado seguir as normas da ABNT, AREMA, UIC, e AAR.

Esse documento recomenda utilizar a superelevação teórica com aceleração centrífuga máxima de 0,65 m/s² calculada através da fórmula $S = 13,1 V^2/R$, sendo que a velocidade utilizada para cálculo seja 3/4 da velocidade máxima de projeto, isto é, 60 km/h. Além disso é estabelecida a superelevação máxima de 160mm para a bitola larga e é dispensada superelevação para curvas com raio superior a 1.718,883m. Por fim determina-se que a variação da superelevação nas curvas de transição não supere 2mm/m.

2.3.3 CBTU

A Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) é uma empresa federal que opera os serviços de transporte de passageiros sobre trilhos nas regiões metropolitanas de Belo Horizonte, Recife, Maceió, João Pessoa e Natal.

A CBTU possui instruções técnicas (IT) para formalizar as características e procedimentos dos serviços de manutenção, operação, projeto e construção. A IT07 – Execução de Projeto Geométrico (CBTU, 2005) é a instrução técnica utilizada neste trabalho. Essa IT tem como objetivo:

“Estabelecer os procedimentos e rotinas para elaboração do projeto geométrico de correção e/ou implantação da via permanente nos empreendimentos a cargo da CBTU”.

A IT07 adota em suas equações as seguintes unidades para cada tipo de variável:

- Velocidade → km/h;
- Raio → metros;
- Superelevação → milímetros.

Para consideração do raio mínimo a IT descreve que o raio mínimo das curvas circulares deverá ser compatível com a velocidade diretriz prevista para o trecho em estudo, e pode ser obtida através das equações:

$$R_{min} = \frac{v_{dir}^2}{20,7075} \text{ para a bitola de } 1,60m \quad (27)$$

$$R_{min} = \frac{v_{dir}^2}{20,4522} \text{ para a bitola de } 1,00m \quad (28)$$

A superelevação teórica é obtida através das equações:

$$S_t = 13,13 * \frac{V^2}{R} \text{ para a bitola de } 1,60m \quad (29)$$

$$S_t = 8,38 * \frac{V^2}{R} \text{ para a bitola de } 1,00m \quad (30)$$

Essa superelevação deverá ser utilizada para vias em que circulam apenas trens de passageiros, e para as linhas mistas adota-se 2/3 do valor encontrado para a superelevação

teórica. A superelevação mínima deve considerar aceleração lateral não compensada de 0,65 m/s², resultando nas seguintes equações:

$$S_{min} = 13,13 * \frac{V^2}{R} - 111, \quad \text{para a bitola de 1,60m} \quad (31)$$

$$S_{min} = 8,38 * \frac{V^2}{R} - 71, \quad \text{para a bitola de 1,00m} \quad (32)$$

A superelevação máxima é 10% do valor da bitola, isto é:

$$S_{max} = 160 \text{ mm}, \quad \text{para a bitola de 1,60m} \quad (33)$$

$$S_{max} = 100 \text{ mm}, \quad \text{para a bitola de 1,00m} \quad (34)$$

E, por fim, a rampa de superelevação normal é de 1,5mm/m, sendo admissível, para casos excepcionais justificados, o máximo de 4mm/m.

2.3.4 AREMA

A *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA) é uma associação Norte Americana que publica recomendações práticas para projeto, construção e manutenção da infraestrutura ferroviária (AREMA, 2010).

2.3.4.1 Transição em espiral

A transição em espiral deve ter um comprimento tal que a aceleração lateral desbalanceada atuando nos passageiros não exceda 0.03g conforme a Equação 35. A transição em espiral também deve ter comprimento suficiente para limitar as forças de torção produzidas conforme a Equação 36. O maior dos comprimentos de espiral deverá ser adotado.

$$L = 12,15 * (Eu) * V \quad (35)$$

Onde:

L = comprimento da espiral desejado em metros

E_u = elevação desbalanceada em metros

V = velocidade máxima dos trens em km/h

$$L = 744 * Ea \quad (36)$$

Onde:

L = comprimento da espiral desejado em metros

E_a = elevação atual em metros

2.3.4.2 Superelevação das curvas

A superelevação nas curvas é calculada pela Equação 37:

$$e = \frac{B \cdot v^2}{127 \cdot R} \quad (37)$$

Onde:

E = superlevação de equilíbrio em metros

B = bitola em metros

V = velocidade em km/h

R = raio da curva em metros

2.3.4.3 Tangente entre curvas reversas

Para curvas reversas com ângulo menor que 6° não é necessária uma tangente, porém para as curvas reversas com ângulo entre 6° e 13° é recomendado que se tenha uma tangente mínima de acordo com a Tabela 1:

Grau da curva reversa	Comprimento de tangente recomendado
Menor que 6°	0
6° - 7°	3 metros
7° - 8°	6 metros
8° - 9°	7,6 metros
9° - 10°	9,1 metros
10° - 11°	12,2 metros
11° - 12°	15,2 metros

Tabela 1: Comprimento de tangente recomendado

2.3.4.4 Curvas Verticais

As curvas verticais devem ter comprimento mínimo determinado pela Equação 38:

$$L = D * V^2 * \frac{K}{A} \quad (38)$$

Onde:

A = aceleração vertical em metros/s²

D = valor absoluto de diferença entre greides em decimal

K = 0.253(fator de conversão)

L = Comprimento da curva vertical em metros

V = velocidade do trem em km/h

Para transporte de passageiros A = 0,1829 m/s² e para transporte de carga A = 0.0305 m/s².
A distância mínima entre curvas verticais é de 30,5 metros.

2.4 Tecnologia computacional para realização de *code-checking*

Nesta parte serão abordados os temas ligados à tecnologia computacional necessária para realização do trabalho.

2.4.1 *Code-Checking*

A maior parte dos projetos de construção deve passar por um processo de verificação que é baseado em um código de verificação (*code checking*), e parte deste processo geralmente é feito manualmente, mesmo quando auxiliado por uma ferramenta inteligente (Martins e Monteiro, 2013). Um processo automatizado para a verificação dos códigos pode lidar mais facilmente com uma grande variedade de critérios e regras que controlam as especificações dos produtos e edifícios (Eastman et. al., 2009).

A análise automática de normas baseada em BIM tem como propósito responder se um determinado projeto está em concordância com as especificações impostas pelas normas que o regulamentam. Por ser feita de forma automática, há uma redução no tempo de execução da checagem e diminuição da probabilidade de erros e violações de conformidade, tanto em estágios iniciais quanto no projeto final, reduzindo o retrabalho e conseqüentemente o custo final do projeto (Salama e El-Gohary, 2013).

Com o desenvolvimento da tecnologia BIM, a elaboração de sistemas automáticos de *code checking* na construção torna-se viável. Esse sistema é considerado como uma das tecnologias com maior potencial para fornecer um valor significativo para a Arquitetura e Engenharia (Li, 2015).

O desenvolvimento do BIM vem mudando a realidade na engenharia, porém ainda apresenta baixo nível de maturidade em seu uso por parte da indústria da construção. O interesse no BIM é alto devido ao seu grande potencial, porém o seu uso integral em projetos e durante todo o processo construtivo é raro (Porwal e Hewage, 2013). Apesar de não ser uma nova abordagem, o BIM só agora começa a ser explorado mais profundamente, de forma a mostrar a real aplicabilidade de seu grande potencial (Monteiro, 2010). Enquanto ferramentas CAD exigem uma avaliação manual dos desenhos, o BIM suporta a automatização desta tarefa (Lee et. al., 2012). Além disso, a adoção do padrão internacional *Industry Foundation Classes* (IFC) representa um grande avanço devido a sua capacidade de interoperabilidade entre *softwares* BIM. Assim, um incentivo ao uso do BIM nos projetos e processos construtivos de forma integral seria a adoção de ferramentas baseadas em BIM que tragam benefícios ao desenvolvimento dos projetos e obras, como a análise automática de normas (Porwal e Hewage, 2013) (Monteiro, 2010) (Zhang e El-Gohary, 2015).

A exploração e o desenvolvimento de sistemas baseados em regra começaram na década de 1980, quando Garrett e Fenves (1987) propuseram um processador de padrões baseados em regras para o projeto de um componente estrutural que não é dependente de qualquer padrão.

Uma verificação automática de códigos de incêndio foi examinada por Delis e Delis (1995) e, em seu trabalho, é discutida a concepção e implementação do protótipo *Fire-Code Analyser* que identifica todas as violações de norma e as apresenta em um relatório.

Em um procedimento regular de *code checking*, todos os parâmetros são checados, e, se qualquer um deles violar alguma norma, o projeto tem que ser revisto e desenvolvido novamente. Após este processo, o modelo tem que ser checado novamente, até que todos os parâmetros sejam atendidos pela norma (Martins e Almeida, 2010). É um trabalho lento, que demanda muito tempo dos projetistas e pode gerar ambiguidades e inconsistências.

É cada vez mais evidente a necessidade de informatizar os códigos de construção e automatizar o processo de *code checking*. Dentro do contexto de BIM, alguns sistemas baseados em regras são usados como um verificador de modelo para verificar o projeto introduzido a respeito das normas de construção.

Eastman et. al. (2009) define um sistema automático de *code checking* como um *software* que apenas analisa as informações de um determinado projeto de construção, sem alterar qualquer aspecto do mesmo. Esses sistemas apenas realizam uma análise do projeto baseada em uma norma apresentando resultados qualitativos, como “aprovado” ou “reprovado”. O conceito desse sistema tem sido estudado por mais de duas décadas, quando Dym et. al. (1988) propôs um sistema capaz de analisar um certo projeto arquitetônico baseado no *Life Safety Code* da Associação Nacional de Proteção Contra o Fogo (*National Fire Protection Association*). Este trabalho desenvolveu um sistema protótipo na Universidade de Massachusetts chamado de *Life Safety Code Advisor*.

A partir de dados extraídos de projetos que utilizam o BIM é possível desenvolver um processo de checagem de regras que avalie a adequação existente entre os textos normativos e o projeto. Esse processo pode ser resumido por quatro estágios principais (Eastman, 2009):

1. Interpretação e estruturação lógica das regras: os textos regulamentadores geralmente são escritos em linguagem natural, sendo que cada um possui sua própria estrutura didática. Assim, é fundamental que tais textos sejam transformados em uma base de dados que possa ser entendida por computadores. O principal ponto desta etapa é como essa transformação será realizada e qual linguagem semântica será utilizada.

Antes da transformação, um processo de sistematização das regras pode ser realizado com o objetivo de facilitar o processo de estruturação. Solihin e Eastman (2015) elaboraram uma classificação das regras em quatro grupos, de acordo com a sua complexidade computacional: (1) regras que requerem um ou um pequeno grupo de dados, (2) regras que requerem um simples atributo de valor derivado, (3) regras que requerem uma estrutura de dados estendida e (4) regras que requerem uma "prova de solução". Os dois primeiros grupos (1 e 2) são mais promissores, já que são relativamente simples de implementar, enquanto os outros grupos apresentam maiores dificuldades de progresso (Solihin e Eastman, 2015).

Na maioria dos casos, a extração das regras dos textos e sua conversão para uma linguagem computacional é realizada manualmente. Zhang e El-Gohary (2015) desenvolveram uma série de algoritmos que, em um processo dividido em cinco etapas (classificação dos textos, extração da informação, transformação da informação, implementação e avaliação), transforma os textos regulamentadores de forma automática em argumentos lógicos com uma precisão de 98.2%, mostrando-se uma alternativa eficiente para esta etapa (Zhang e El-Gohary, 2015).

Tabelas de decisão também são interessantes para estruturar códigos escritos em linguagem natural, devido a sua relativa simplicidade e de tirar vantagem do desenvolvimento recente de mecanismos de regra. Porém evitar a grande quantidade de regra em seu banco de dados é um desafio (Luo, 2015). Outras formas de abordar este tópico é utilizando a lógica deôntica (lida com obrigações, proibições e permissões) (Salama, 2013) ou por métodos baseados em ontologia (especificação formal e explícita de conceituações) (Luo, 2015), que oferecem um nível satisfatório de representação de dados e raciocínio para a elaboração das expressões lógicas.

2. Desenvolvimento do modelo construtivo e seleção dos dados necessários: os projetos desenvolvidos usando BIM têm como característica a disponibilização de uma grande quantidade de informação. Para que a checagem seja feita de forma eficiente, é necessário realizar a seleção dos dados relevantes a este processo. Assim, o ponto chave desta etapa é o desenvolvimento de um meio para identificar de forma eficiente tais dados dentro de um grande banco de dados, de modo que os dados selecionados abranjam todo o conjunto necessário para realizar a verificação completa.

Lee (2012) desenvolveu um processo de implementação de um banco de dados que padroniza o nome de locais a partir da solução de problemas como de ordem taxonômica, léxica, de classificação ou de singularidade. Este processo pode facilitar a seleção e o uso dos dados (Lee, 2012).

3. Execução da checagem: a checagem dos dados deve fazer a relação entre as exigências das regras e os dados selecionados, julgando qual dado se encontra conforme ou não-conforme. O sistema de checagem pode ser tanto um programa independente quanto incorporado ao *software* BIM utilizado (Eastman, 2009). Isso faz com que o principal desafio desta etapa seja o

desenvolvimento de um algoritmo de checagem que consiga realizar a verificação com exatidão e agilidade.

4. Relatório dos resultados: o relatório final deve conter informações que auxiliem os projetistas a ter uma visão geral dos pontos analisados e identificar e corrigir os pontos de não-conformidade levantados pela checagem. Com isso, é fundamental para esta etapa a seleção de quais dados devem estar presentes no relatório. É imprescindível que haja relatórios gráficos e uma lista com todos pontos checados, seus respectivos resultados (conforme ou não-conforme) e a identificação da parte do texto que levou à conclusão (Eastman, 2009).

Atualmente, é possível notar diversas aplicações desse conceito em evolução. Entre as aplicações existentes, podemos citar o desenvolvimento da análise automática de regras para fundações profundas (Luo e Gong, 2015), processos construtivos (Jiang e Leicht, 2014), proteção a quedas (Zhang et. al., 2013), sistemas de evacuação (Choi et. al., 2014) e sistemas de distribuição de água (Martins e Monteiro, 2013). Todas elas contribuem para a superação da atual dificuldade de aplicação do licenciamento automático de normas na prática, além de desenvolver sistemas cada vez mais precisos e abrangentes. Deve-se observar que, apesar do processo ser semelhante, cada área de aplicação possui suas particularidades, podendo necessitar de adaptações para aumentar a eficiência do processo. Na análise automática de proteção a quedas, por exemplo, é necessário associar dados temporais aos objetos em BIM, já que a proteção precisa ser atualizada dependendo do estágio em que a obra se encontra (Zhang et. al., 2013). Porém, dentro de uma mesma área de aplicação, regras que variam em diferentes regiões/países ou que são atualizadas constantemente podem ser adaptadas, já que o algoritmo principal não muda (Tan, Hammad e Fazio, 2010).

O sistema automático de *code checking* pode ser aplicado em inúmeras atividades na construção civil, cobrindo todo o ciclo de vida de uma construção (Eadie et al., 2013). Se, por exemplo, padrões de segurança são checados automaticamente, os riscos podem ser prevenidos antes mesmo do início da construção (Zhang et al., 2013). Certificados de sustentabilidade como LEED e AQUA também podem ser mais facilmente alcançados utilizando o *code checking* em plataforma BIM (Azhar et al., 2011), apoiando as decisões de manutenção preventiva/corretiva em fases anteriores do seu ciclo de vida (Motawa et. al., 2013). Nesta mesma linha de pesquisa, Cheng e Das (2014) apresentaram uma estrutura baseada em *web service* que integra as informações necessárias para projetos de edifícios ecologicamente

corretos, automatiza os processos de avaliação do projeto e facilita atualizações simples no modelo do edifício baseadas em dados BIM.

Boukamp e Akinici (2007) propuseram um sistema automático aplicado ao processamento de especificações de construção, contribuindo para a automatização do processo de inspeção e de detecção de erros. Também pode ser destacado o trabalho de Luo e Gong (2015), que elaboraram um processo para verificação de planos de construção de fundações profundas utilizando uma plataforma BIM. O processo contribuiu para diminuir os problemas relacionados à checagem manual, proporcionando avanços relacionados à precisão e eficiência.

Malsane et. al. (2015) propôs uma metodologia para um sistema automático de *code checking* baseado no formato internacional IFC (*Industry Foundation Class*). No estudo, foram revisados trabalhos anteriores de forma a identificar os pontos primordiais para avanços na área, além de ter sido proposto um modelo orientado a objetos de modo a facilitar a interação entre a plataforma BIM e o conjunto de normas a serem seguidas.

2.4.2 Code Checking em projetos ferroviários

Projetos ferroviários possuem diversos elementos geométricos, como tangentes, curvas horizontais, curvas verticais e seções em aterro/corte/mistas (Brina, 1988). Esse tipo de dados pode ser tratado de forma relativamente simples quando aplicados ao processo de análise automática. Além disso, por estarem ligados à área de infraestrutura, os projetos quase sempre estão ligados a entidades públicas, estando sujeitos a processos licitatórios e a diversas normas regulamentadoras. Esse conjunto de fatores viabiliza a aplicação da análise automática de normas em Projetos Ferroviários, que trará como benefícios não só a sua aprovação em processos licitatórios, mas também a garantia de que as condições geométricas de projeto estejam dentro dos padrões mínimos de conforto, segurança e desempenho. Além disso, a exploração experimental de diferentes opções *designs* em vários estágios (Zhang et. al., 2013) é facilitada, já que o projetista pode checar as respectivas adequações às normas de forma mais eficiente (Zhang e El-Gohary, 2015).

A padronização dos textos normativos em diferentes esferas (pública e privada), apesar de se processar em um ritmo lento, é um processo altamente desejável, já que traria grandes benefícios para o processo de análise automática, beneficiando tanto projetistas quanto clientes. Alguns países, como os Estados Unidos e Singapura, já trabalham na estruturação do

regulamento de alguns códigos e no investimento em sistemas de licenciamento automático (Choi et. al., 2014), (Martins e Monteiro, 2011). Uma forma de acelerar esse processo pode ser a difusão de modelos parciais de análise automática de normas, que contribuiriam para familiarizar a comunidade com esta tecnologia (Monteiro, 2010). Além disso, o desenvolvimento de modelos parciais contribui para a evolução da análise automática de normas, aumentando cada vez mais a sua capacidade de checar regras cada vez mais complexas. Outro fator contribuinte seria a busca por uma melhor comunicação entre os projetistas e desenvolvedores de *softwares* de análise automática de normas, que resulta em processos de melhor qualidade (Porwal e Hewage, 2013), (Zhang et. al., 2013). Por fim, Malsane (2015), em uma revisão de trabalhos anteriores sobre checagem automática de normas, conclui que a maioria dos problemas associados ao assunto podem ser superados por meio da formalização do conhecimento na área.

A única linha de pesquisa ligada a automação na análise de normas encontrada na literatura é a de Porto et. al. (2015), que apresentam em seu trabalho um sistema de checagem automática de normas em projetos de infraestrutura ferroviária, através de uma tabela do Excel, onde o processo de *code checking* é realizado, porém, sendo necessária a inserção dos dados de cada trecho manualmente. A conclusão desse artigo mostra que o ideal seria se o sistema de checagem automática de normas fosse inserido dentro do *software* AutoCAD Civil 3D, de forma que os dados da geometria da linha férrea fosse coletados de forma automática, o que tornaria a análise inteiramente automática.

2.4.3 BIM

É difícil chegar a um acordo sobre a definição de BIM ou um consenso dos vários atores envolvidos em um projeto de construção (Barlish e Sullivan, 2012). Neste trabalho é utilizada a definição creditada à *National BIM Standard (NBIMS) Project Committee of the BuildingSMARTalliance* citado em (Barlish e Sullivan, 2012): "O *Building Information Model* (BIM) é uma representação digital das características físicas e funcionais de uma instalação. Como tal, serve como um recurso de conhecimento compartilhado para obter informações sobre uma instalação, formando uma base confiável para decisões durante o seu ciclo de vida desde o início ao fim. O BIM é uma representação digital compartilhada fundada em padrões abertos de interoperabilidade".

Em termos gerais, BIM é uma tecnologia com a capacidade de projetar, armazenar, analisar, gerenciar e compartilhar todos os dados em um projeto durante todo o seu ciclo de vida. Todas as partes interessadas, incluindo proprietários, arquitetos, engenheiros, construtores, gestores e operadores, podem se beneficiar desta nova tecnologia. Ao contrário de modelos 2D, BIM não é só uma ferramenta de modelagem, e sim uma ferramenta de análise e compartilhamento de informações entre todas as partes (Gu et al., 2007).

A adoção do BIM na indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC) é muito promissora, considerando a vasta gama de aplicações, tais como o *design* sustentável e a cooperação multidisciplinar (Gu e London, 2010).

É interessante que sejam discutidas criticamente as comuns promessas de benefícios relacionadas ao uso de plataformas BIM, assim como deve ser destacado que a implementação desse tipo de tecnologia requer experimentos locais e um processo contínuo de aprendizagem e melhoramentos baseado em estudos prévios (Miettinen e Paavola, 2014).

Os benefícios de usar o BIM em grandes projetos de infraestrutura podem ter um exemplo no projeto do gasoduto na Irlanda (Ward et al., 2014), que envolveu um grande grupo de profissionais com experiência em diversas áreas. A modelagem 3D facilitou a comunicação entre cliente, empreiteiros e especialistas e também a verificação dos aspectos de segurança durante a fase de concepção.

Considerando a importância da sustentabilidade hoje em dia, BIM tem sido usada para estudos desenvolvidos que poderiam levar a novas técnicas que têm menor impacto negativo sobre o meio ambiente, melhorando vários aspectos da indústria da construção. Pode ser citado o estudo de Abanda e Byers (2016) sobre o impacto da orientação da construção sobre o consumo de energia em um edifício doméstico usando BIM. Esta investigação tem sido bem-sucedida para provar que a orientação de um edifício pode reduzir significativamente a necessidade de sistemas artificiais para aquecimento e iluminação, afetando diretamente o consumo de energia.

De acordo com Bryde et. al. (2013), o uso do BIM deve envolver estudos em ordem à sua implementação, como análise de custo/benefício e atividades relacionadas à educação e formação. Em seu trabalho, ele estudou os benefícios do projeto do BIM e o benefício mais frequentemente relatado estava relacionado com a redução de custos e gestão de projetos. Mas

efeitos negativos também foram relatados, principalmente focado na utilização de *software* BIM.

2.4.4 CAD

Computer-Aided Design (CAD), ou Desenho Assistido por Computador, é o nome para sistemas computacionais que têm como objetivo auxiliar os projetistas a modelarem um produto no formato digital por meio de desenhos técnicos (de Lima e Schutzer, 2009). Os sistemas CAD trouxeram um grande avanço para a sociedade e seu uso substituiu as pranchetas de desenho (Solinho, 1998).

O uso de *softwares* CAD proporciona grande agilidade para a criação de desenhos técnicos, porém, a forma de se projetar nos primeiros sistemas CAD não pode ser considerada como uma mudança de paradigmas devido ao fato de que essa forma seria a mesma que a do papel, com a vantagem de se ter as ferramentas no computador que garantem maior agilidade e facilidade na modelação do projeto. Foi com a evolução dos sistemas CAD que houve a quebra do paradigma no desenvolvimento de projetos.

A evolução dos sistemas CAD pode ser descrita em três principais fases: a primeira delas é o desenho auxiliado por computador, onde apenas as ferramentas de desenho foram transferidas para um computador; a segunda é a modelagem geométrica, na qual as formas geométricas seriam representadas através de fórmulas matemáticas; a terceira é a modelagem de produto, em que há uma atribuição de relacionamentos associativos e paramétricos: além das informações geométricas de um objeto tem-se também informações não-geométricas, como custo, peso, resistência, etc. (Scheer S. et al, 2007).

O uso de sistemas CAD desenvolvidos incluem a simulação de eventos ocorrendo sobre o modelo projetado. Hoje, esses sistemas são utilizados em diversas áreas, desde a engenharia até as áreas de saúde, como medicina e odontologia.

2.4.5 AutoCAD Civil 3D

AutoCAD Civil 3D (Civil 3D) é um *software* da Autodesk com suporte à tecnologia BIM criado para melhorar a elaboração de projetos, incluindo uma documentação de construção da engenharia civil (Autodesk, 2017). Esse software possui todas as funcionalidades do tradicional

AutoCAD, acrescido de várias ferramentas exclusivas para desenvolver projetos na área da engenharia de infraestrutura urbana, especialmente na área de rodovias e ferrovias.

O Civil 3D, assim como o AutoCAD, possibilita o desenvolvimento de aplicativos associados ao seu *software*, isso é, um aplicativo que pode interagir com o *software* original de forma que se expandam as funcionalidades padrões do *software*. Dessa forma, tarefas podem ser automatizadas, de maneira que o computador processe tudo aquilo que pode ser feito baseado em um código. Esse código é resultado da transformação de ações em instruções lógicas que o computador pode interpretar e processar.

A interação entre o Civil 3D e o aplicativo se dá através da utilização da API (*Application Programming Interface*) específica do programa que se deseja interagir no projeto do aplicativo elaborado.

2.4.6 Programação

A programação utilizada para o desenvolvimento desse trabalho requer conhecimentos sobre a programação orientada a objetos, esse modelo de programação utiliza objetos, que são instâncias de uma classe, para que as classes existentes no projeto de programação se relacionem entre si. É importante saber a definição de classe, objeto, atributos e métodos.

Uma classe é representação de um conjunto de objetos semelhantes, a classe define quais tipos de atributos um objeto pode ter, assim como quais métodos o objeto tem para realizar suas ações. Um exemplo de classe pode ser a classe dos cachorros, que possui atributos como nome, cor, raça, etc. e como métodos a habilidade de andar, deitar, latir, etc. Uma classe descreve uma família de elementos similares (AGUILAR, 2008).

Um objeto é uma instância de uma classe que possui uma determinação dos atributos da classe, um objeto pode ser visto como um cachorro específico, com o nome: “Tico”, cor: “Laranja”, raça: “Vira-lata”; que é capaz de realizar todos os métodos de sua classe, os cachorros. (AGUILAR, 2008)

Um atributo é uma característica do objeto, ele pode ser um atributo de instância, que varia para cada objeto, ou um atributo de classe, que é compartilhado entre todos os objetos de uma mesma classe. (AGUILAR, 2008)

Um método define as habilidades de um objeto, através dos métodos o objeto consegue realizar ações específicas ao se invocar o método. (AGUILAR, 2008)

3 METODOLOGIA E MÉTODOS

Método de pesquisa é considerado um conjunto de ferramentas e técnicas para realizar uma pesquisa (Walliman, 2011), podendo ser visto como uma sequência de etapas para atingir um objetivo de pesquisa (Gerhardt, 2009). Metodologia de pesquisa tem um significado diferente de método de pesquisa. Segundo Wazlawick (2009), a metodologia de pesquisa é o estudo dos métodos de pesquisa, de forma que se possa avaliar os diversos métodos disponíveis e determinar os melhores métodos para realização de uma pesquisa específica.

Para auxiliar na determinação dos melhores métodos de pesquisa é necessário classificar a pesquisa que se pretende realizar. Existem diversos tipos de classificação de uma pesquisa científica e a combinação dessas classificações permite que o pesquisador escolha o método mais eficiente para sua pesquisa (Fontelles et. al., 2009). A pesquisa deste trabalho não se limitará às práticas tradicionais de pesquisas em ciências naturais e sociais, pois essas práticas adotadas sozinhas não são suficientes para construir um método adequado para suprir os objetivos de pesquisa.

Segundo Dresch (2013) há uma lacuna quando se empregam exclusivamente as ciências tradicionais (ciências naturais e sociais) para a condução de pesquisas tecnológicas. As pesquisas que têm o foco em estudar a resolução de problemas não conseguem se sustentar no paradigma das ciências tradicionais. Para contornar essa lacuna existe o *Design Science* (ciência de projeto), que é uma ciência que busca desenvolver e projetar soluções para melhorar sistemas existentes, resolver problemas ou criar novos artefatos para aprimorar alguma atividade exercida pelo homem.

Uma pesquisa que tem como objetivo a resolução de problemas práticos pode ser enquadrada no *Design Science*. Para garantir o rigor e a relevância científica da pesquisa em *Design Science* tem-se o *Design Science Research* (ciência de pesquisa de projeto, DSR) que é um método de pesquisa que pode conduzir as pesquisas do *Design Science* (Dresch, 2013).

O DSR é um tipo de metodologia de pesquisa criado para dar rigor científico às pesquisas cujo objetivo seja a criação de projeto de artefatos. Geralmente, uma pesquisa que segue o DSR é focada na resolução de problemas e os princípios dessa metodologia estão ligados à engenharia de coisas artificiais (Dresch, 2013).

Um artefato pode ser considerado tudo aquilo que não seja natural e que seja construído pelo homem (Simon, 1996) com o objetivo de resolver algum problema em um sistema, de forma que seu desempenho seja maior.

Embora existam várias formas de se classificar uma pesquisa, este trabalho será classificado conforme a Figura 3.1:

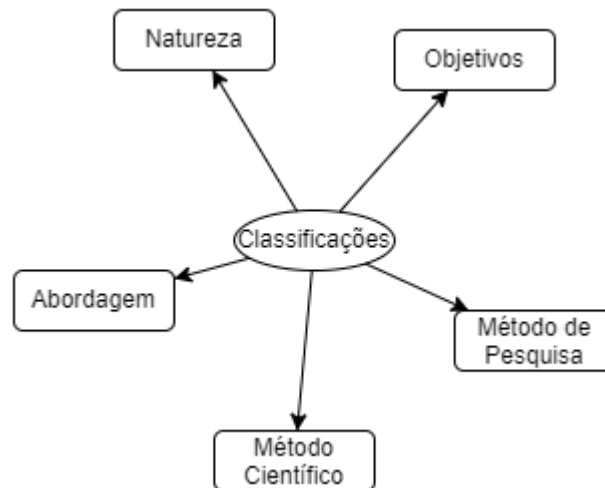


Figura 3.1: Classificação da pesquisa

Natureza da pesquisa

A natureza da pesquisa se refere à finalidade do conhecimento gerado por intermédio da pesquisa, podendo ser uma pesquisa básica ou uma pesquisa aplicada (Gerhardt, 2009), conforme a Figura 3.2.

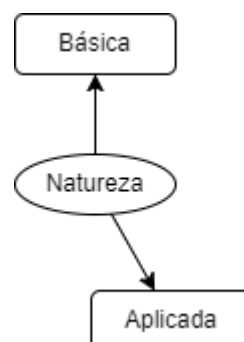


Figura 3.2: Natureza da pesquisa

A pesquisa básica objetiva gerar conhecimentos novos e úteis para o avanço da ciência, sem aplicação prática prevista, enquanto a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimento para aplicação prática e dirigido à solução de problemas específicos (Gerhardt, 2009).

Objetivos de pesquisa

Os principais objetivos das ciências tradicionais são explorar, descrever ou explicar. Têm-se ainda a prescrição e o projeto como objetivos de pesquisa, conforme a Figura 3.3.



Figura 3.3: Objetivos de pesquisa

A pesquisa exploratória busca esclarecer ou modificar conceitos e ideias e geralmente envolve levantamento bibliográfico, documental, entrevistas ou estudo de caso. A pesquisa descritiva tenta descrever características de um fenômeno ou determinar relação entre variáveis, geralmente usando a coleta de dados. A pesquisa explicativa tenta determinar os fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos, explicando a razão das coisas, e requer o uso de um método experimental (Gil, 1994).

Complementando os objetivos de pesquisa das ciências tradicionais têm-se prescrição e projeto (criação de artefatos), que são objetivos de pesquisa da metodologia do DSR, bastante comum nas engenharias, que tentam criar um conhecimento científico com o objetivo de solucionar problemas por meio da criação de artefatos (Dresch, 2013).

Forma de abordagem

As formas de abordagem são duas: quantitativo ou qualitativo, conforme a Figura 3.4.

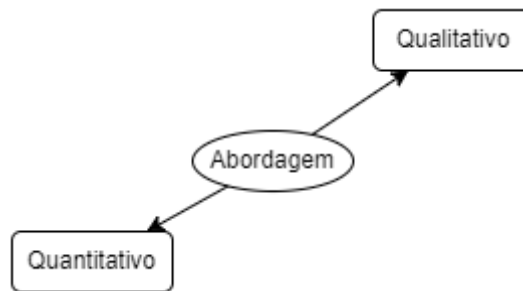


Figura 3.4: Abordagem da pesquisa

A pesquisa quantitativa considera o valor numérico das variáveis, sendo necessário transformar os fatores de pesquisa em números para realizar a classificação e a análise dos resultados. A pesquisa qualitativa tenta interpretar os fenômenos sem atribuir valores numéricos a eles, levando em conta a subjetividade de cada variável (Silva e Menezes, 2005)

Método científico

Método científico é um conjunto de atividades que tem por objetivo desenvolver conhecimento científico, sendo necessário para dar validade, rigor e relevância a uma pesquisa. Existem três métodos nas ciências tradicionais: método indutivo, método dedutivo e o método hipotético-dedutivo. Para o Design Science outro método é apresentado, o método abdução, conforme a Figura 3.5.

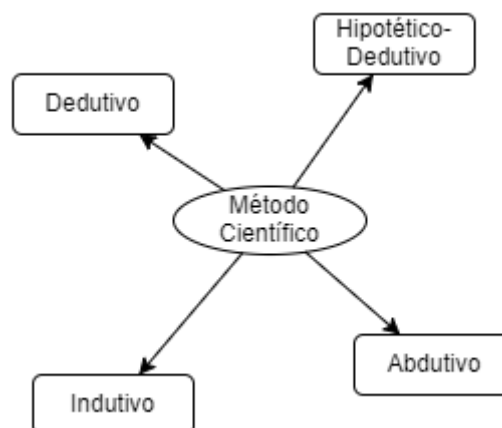


Figura 3.5: Métodos Científicos

O método indutivo tem como base para criação de novos conhecimentos a observação, ou seja, por meio de experiências é possível observar padrões e formular uma hipótese que explica determinados pontos da experiência. Usando esse método chega-se a conclusões prováveis (Gerhardt, 2009).

O método dedutivo parte de um caso geral para chegar a um caso específico, isto é, a partir de princípios verdadeiros é possível chegar a conclusões de maneira formal. É um método muito utilizado na matemática e na física, áreas regidas por leis (Gerhardt, 2009).

O método hipotético-dedutivo parte de uma hipótese que seria capaz de explicar algum problema. Essa hipótese então é submetida a testes que tentarão provar que ela é falsa. Caso esses testes não consigam provar a falsidade da hipótese ela será dada como corroborada. Então, até o momento que algum fato a torne inválida, a hipótese será dada como verdadeira (Gerhardt, 2009).

O método abduutivo é um método criativo, em que se estudam os fatos e propõem-se teorias para explicá-los. É um processo de criação de hipóteses explicativas para determinado problema, sendo o único método científico que possibilita a sugestão de uma nova ideia. Para testar as hipóteses do método abduutivo outros métodos científicos podem ser utilizados. Em geral, o método abduutivo sugere o que pode ser a solução do problema (Dresch, 2013).

Procedimentos ou métodos de pesquisa

Os procedimentos científicos são necessários para fornecer a orientação para a realização das pesquisas, proporcionando meios técnicos para garantir a objetividade e precisão ao conduzir a pesquisa (Gil, 1994). Em uma pesquisa pode-se adotar mais de um procedimento de forma combinada.

Os principais procedimentos da ciência tradicional são: pesquisa experimental, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa de campo, pesquisa de levantamento, pesquisa com *survey*, estudo de caso, pesquisa ação e modelagem. Complementando os métodos de pesquisa das ciências tradicionais há também o *Design Science Research*, que é um método de pesquisa que operacionaliza os conceitos da *Design Science* (Dresch, 2013). Os métodos são mostrados na Figura 3.6.

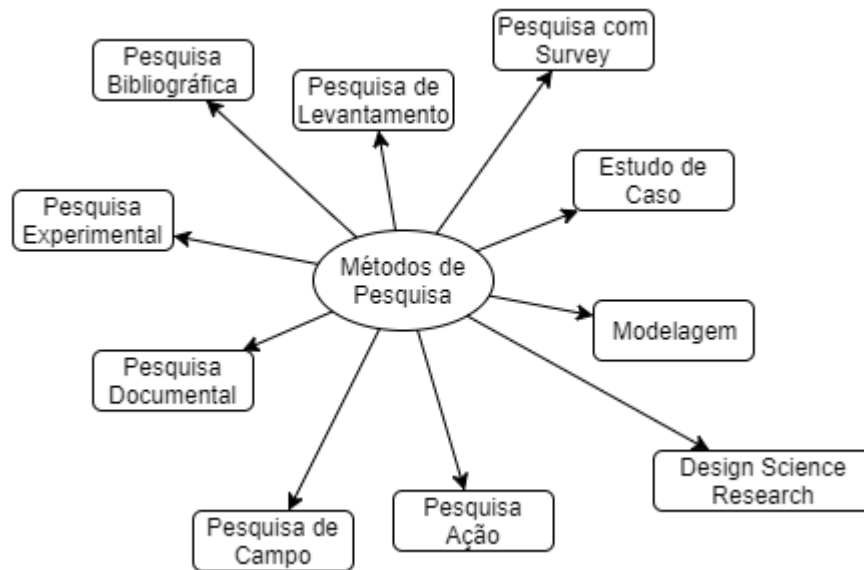


Figura 3.6: Métodos de pesquisa

3.1 Utilização do Design Science Research

O Design Science Research busca construir, investigar, validar e avaliar artefatos, a fim de resolver problemas práticos (Bax, 2014). O conhecimento produzido pelo DSR geralmente está em forma de uma prescrição para resolver um problema real ou de um projeto para construir um artefato. Os artefatos criados pelo DSR são classificados em constructos, modelos, métodos ou instanciações que podem resultar em um aprimoramento de teorias (Dresch, 2013).

De acordo com Wazlawick (2009), apenas o desenvolvimento de *softwares* não é considerado uma atividade de pesquisa científica, e os projetos de rotina que apenas aplicam processos já conhecidos não geram um conhecimento novo para a área (Hevner et. al., 2004). Para ser considerado como uma pesquisa científica é necessário que o conhecimento científico da área seja aprimorado. Bax (2014) mostra que o DSR é a metodologia que pode auxiliar o pesquisador a criar um conhecimento teórico durante a criação de artefatos, dando um caráter científico a sua pesquisa e garantindo o rigor e a relevância científica.

Segundo Bax (2014), as pesquisas tecnológicas usam a tecnologia da informação para atender às necessidades práticas da comunidade e os artefatos criados são a base operacional dessa pesquisa. A construção e aplicação desse artefato gera o conhecimento e a compreensão de um problema do mundo real, de forma a avançar com o conhecimento teórico da área.

Wieringa e Heerkens (2006) mostra que há dois tipos de problemas: o problema prático e o de conhecimento. A principal diferença entre esses problemas são os seus objetivos: enquanto

o problema prático altera o conhecimento e aplica no mundo para validá-lo, o problema teórico altera o estado do mundo e ganha conhecimento (Bax, 2014).

Wieringa (2009) estrutura um projeto de *Design Science* como um conjunto de problemas aninhados, decompondo um problema prático em subproblemas teóricos e práticos. Ele ainda estabelece uma estrutura lógica para resolução de problemas através de um ciclo regulador, que envolve as seguintes etapas:

- Investigação do problema;
- Projeto de soluções;
- Validação da solução;
- Implementação da solução;
- Avaliação da implementação.

A investigação do problema se refere a uma questão teórica para entender e descrever o problema, de forma que todas as suas particularidades sejam compreendidas. O projeto de soluções é a etapa na qual as possíveis soluções para o problema são propostas. Ao se propor uma solução, não significa que ela seja levada adiante. Para isso, a etapa de validação tenta avaliar se a solução em questão vai resolver o problema de forma satisfatória. Na etapa da implementação da solução, esta se materializa e é construída no mundo real (Wieringa, 2009).

March e Storey (2008) também mostra uma estrutura para ser seguida, a fim de se obter uma contribuição científica adequada em uma pesquisa baseada no DSR. Essa estrutura possui as seguintes etapas autoexplicativas:

- Identificação e descrição de um problema;
- Evidenciação de que ainda não existem soluções adequadas para resolver o problema;
- Desenvolvimento e apresentação de um novo artefato para resolver o problema;
- Avaliação rigorosa dos artefatos desenvolvidos;
- Exposição da contribuição científica e prática que a pesquisa e o artefato proporcionam.

Classificação de artefatos

Os artefatos serão classificados em quatro categorias, de acordo com March e Smith (1995):

- Constructos (entidades e relações)
 - Conceitos, conceituação para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar as respectivas soluções;
- Modelos (abstrações e representações)
 - Conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos, podendo ser considerado como uma descrição, uma representação de como as coisas são;
- Métodos (algoritmos e práticas)
 - Conjunto de passos necessários para desempenhar determinada tarefa;
- Instanciações (implementação de sistemas e protótipos)
 - As instanciações são a realização do artefato em seu ambiente e informam como implementar ou utilizar determinado artefato e seus possíveis resultados. Trata-se de um conjunto de regras que orientam a utilização dos artefatos (constructos, modelos e métodos) em um determinado ambiente real.

Validação do artefato

A validade de uma pesquisa baseada em DSR deve ser provada a partir da avaliação do artefato desenvolvido, o qual deve evidenciar que atinge os objetivos esperados e cumpre sua função.

Existem cinco métodos para se avaliar um artefato:

- Observacional;
- Analítico;
- Experimental;
- Teste;
- Descritivo.

A avaliação observacional tem como objetivo verificar como o artefato se comporta em um ambiente real. A avaliação analítica busca verificar o desempenho do artefato e quanto ele consegue melhorar o sistema em que está inserido. A avaliação experimental consiste em experimentos controlados, com modelos físicos ou computacionais, com o objetivo de verificar

e demonstrar o comportamento do artefato avaliado. A avaliação por teste pode ser feita por um teste funcional ou estrutural. O teste funcional verifica se o artefato atende aos requisitos do ponto de vista do usuário, enquanto o teste estrutural se baseia na parte interna do artefato, verificando o processamento de entradas e saídas. A avaliação descritiva busca demonstrar a utilidade do artefato, utilizando argumentos existentes na literatura ou construindo cenários em que seu artefato seria útil (Hevner et al., 2004).

3.2 Metodologia para o trabalho

Este trabalho propõe uma solução para a checagem automática de normas em projeto geométrico de superestrutura ferroviária. Esse é um problema prático, que pode ser resolvido com a criação de artefatos para aprimorar a atividade de checagem de normas, sendo assim, o trabalho se enquadra no *Design Science* e será conduzido através do método de pesquisa do *Design Science Research*. Serão criados como artefato um modelo, um método e uma instanciação e a avaliação do artefato ocorrerá por todas as formas descritas anteriormente.

A pesquisa desta dissertação pode ser classificada quanto à natureza como aplicada, visto que seu objetivo é ligado à solução de problemas específicos, com aplicação prática prevista e abordagem metodológica do tipo quantitativa, pois é um trabalho que depende exclusivamente de valores numéricos para avaliação dos resultados. Ela tem como objetivo prescrever e projetar uma solução para um problema real, criando um artefato que auxilie na resolução desse problema, utiliza o método científico abduutivo para criação de hipótese, pois sugere uma nova ideia para se tratar um problema. Como complemento utiliza o método dedutivo, uma vez que parte de princípios verdadeiros para se chegar a conclusões. A classificação do trabalho pode ser resumida de acordo com a Figura 3.7.

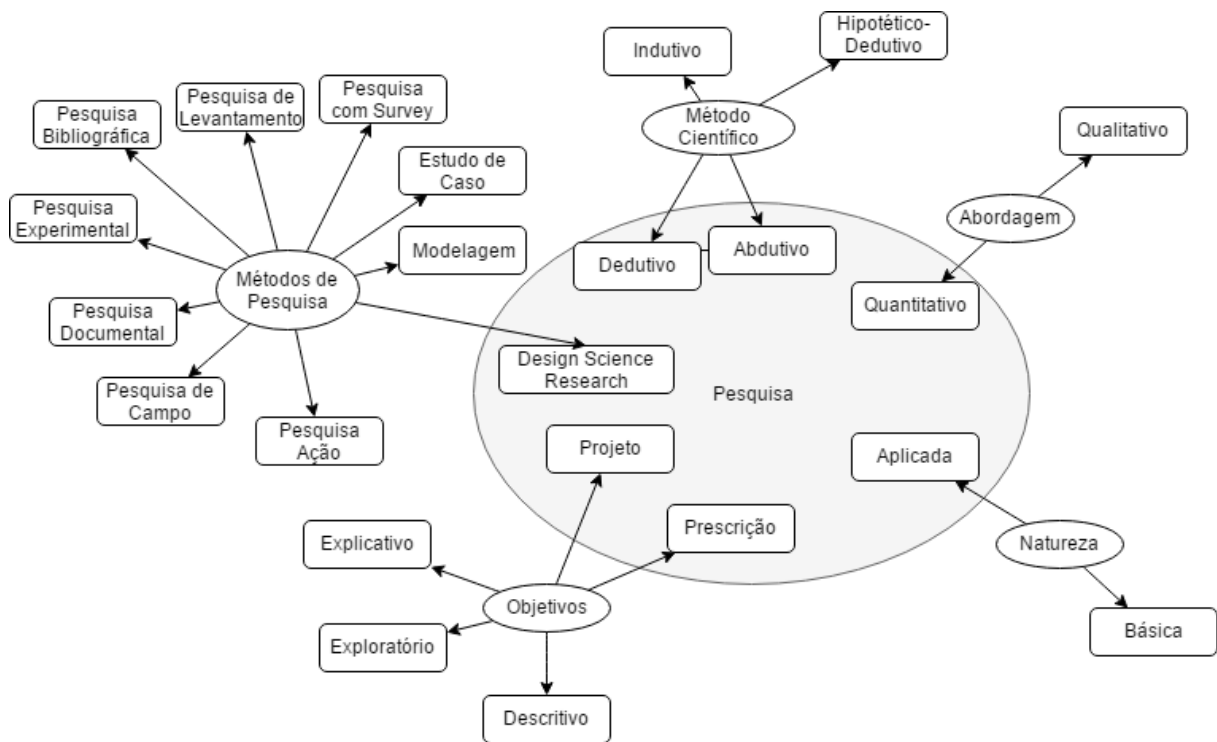


Figura 3.7: Classificação da pesquisa

A solução obtida na pesquisa terá um caráter geral, podendo ser aplicada a qualquer *software* para a realização de análise de normas, porém, o protótipo elaborado será específico para o Civil 3D.

O trabalho seguirá as etapas propostas por March e Storey (2008), por serem mais didáticas. O capítulo de introdução identifica e descreve o problema, a revisão bibliográfica mostra que ainda não existem soluções adequadas para resolver o problema, o desenvolvimento e apresentação do artefato para solução do problema são descritos neste capítulo e no capítulo do desenvolvimento, a avaliação do artefato desenvolvido ocorre no capítulo de resultados e conclusões e a exposição da contribuição prática e científica do trabalho será mostrada na conclusão, conforme a Figura 3.8.



Figura 3.8: Estrutura do Design Science Research para o trabalho

3.3 Método do trabalho para criação do artefato

O trabalho desenvolve como artefato um modelo teórico com as regras de checagem automática de normas em projetos de superestrutura ferroviária. Além disso, desenvolve um método para aplicação do modelo teórico em um problema real e, por fim, desenvolve um protótipo para a realização do método criado. Para validação do modelo teórico serão realizados testes no protótipo em um cenário real, a fim de validar o aumento da eficiência e eficácia na análise/checagem de norma dos projetos analisados.

O método para a elaboração deste trabalho se baseia nas etapas da Figura 3.9, ao longo desse capítulo cada etapa será explicada, ressaltando seus principais pontos.

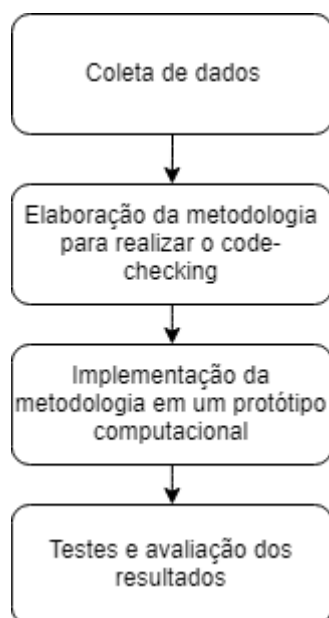


Figura 3.9: Método de trabalho

Coleta de dados

Etapa em que é realizada a pesquisa bibliográfica para levantamento de informação necessária para adquirir conhecimento referente ao que se pretende realizar. Neste caso, primeiramente deve-se definir os elementos e parâmetros que serão analisados nos projetos e, a partir dessa informação, deve-se realizar uma pesquisa em normas, livros, trabalhos científicos, manuais e especificações nacionais e internacionais para obter os limites e fórmulas utilizadas para os cálculos de cada parâmetro em análise.

Os elementos de projetos são as curvas verticais, curvas horizontais, trechos em tangente, trilhos, dormentes e fixação. Cada um desses elementos possui uma série de parâmetros que

devem ser analisados, como, por exemplo, as curvas horizontais, que possuem os seguintes parâmetros: superelevação, superlargura, raio, velocidades máxima e mínima.

A coleta de dados já foi realizada na revisão bibliográfica.

Metodologia para realização do code-checking

A etapa de elaboração da metodologia de análise de normas é necessária para criar os métodos de análise de normas, e é a partir dela que os dados de entrada são relacionados com as regras de verificação necessárias. Essa metodologia será explicada adiante, ainda neste capítulo.

Implementação da metodologia em um protótipo computacional

A etapa de implementação do protótipo computacional é onde a metodologia elaborada será aplicada na criação de um protótipo computacional, o qual realizará a checagem de normas incorporada no ambiente BIM. Esse protótipo possibilita a verificação da metodologia por meio de testes em um modelo real. Os detalhes dessa implementação serão explicados no capítulo de desenvolvimento.

Testes e avaliação dos resultados

A última etapa é a fase de testes e análises, os quais validarão a metodologia criada a partir de testes realizados no protótipo computacional. Os testes e resultados serão exibidos no capítulo de resultados e discussão.

3.4 Metodologia para realização do code-checking

A metodologia proposta para realização do *code-checking* será baseada nas cinco etapas seguintes: determinação do tipo de análise, entrada de dados, interpretação dos dados, realização da checagem, exibição dos resultados. A divisão do *code-checking* em etapas possui a estrutura exibida na Figura 3.10.

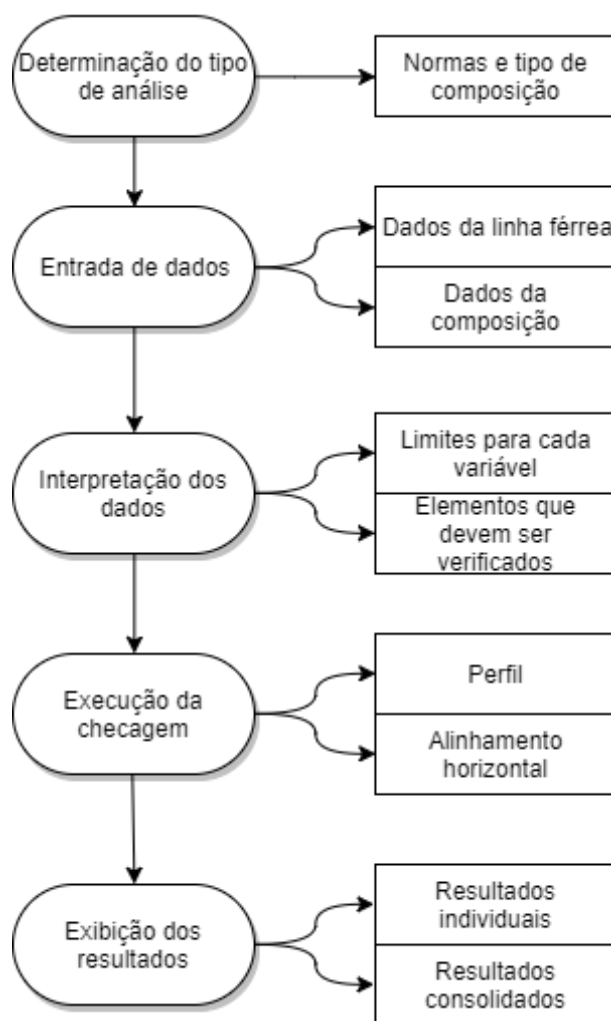


Figura 3.10: Metodologia para realização do Code-Checking

A determinação do tipo de análise é um requisito para informar ao sistema quais dados de entrada necessitam ser preenchidos e quais elementos e normas deverão ser utilizados para essa tarefa. Assim, o usuário poderá inserir os dados necessários para a análise, sendo esses dados correlacionados entre si e verificados segundo as restrições das normas selecionadas para realização da checagem. Com os dados relacionados será possível checar cada parâmetro relevante, de forma que, ao se completar a análise, o sistema possa entregar ao usuário todas as checagens feitas e exibir comentários a respeito dos resultados de cada parâmetro checado, explicitando a fonte do resultado e mostrando fatos relevantes para tal parâmetro.

3.4.1 Determinação do tipo de análise

Para se determinar o tipo de análise é necessário determinar quais normas e instruções técnicas devem ser seguidas, qual tipo de composição transitará na via e quais parâmetros deverão ser analisados. As normas e instruções técnicas selecionadas para a análise determinam os limites aplicáveis para cada tipo de parâmetro. Inicialmente, as normas implementadas no sistema e suportadas pela presente análise são as normas e instruções técnicas brasileiras dos seguintes órgãos institucionais: VALEC, DNIT e CBTU, além das normas adotadas pelo AREMA. Ainda é possível que o usuário insira sua própria norma no sistema através do preenchimento de um formulário ou importando um arquivo padrão que pode ser gerado pelo sistema.

O tipo de composição que percorrerá a via pode ser os trens de carga, de passageiros ou mistos. Os principais parâmetros do projeto geométrico de superestrutura ferroviária são separados em grupos de acordo com a sua classe: curvas de transição, curvas verticais, curvas horizontais e tangentes. Para cada classe pode-se escolher uma série de parâmetros, conforme se mostra a seguir:

Para as curvas de transição tem-se as especificações de:

- Rampa de superelevação máxima;
- Comprimento de transição mínimo.

Para as curvas verticais tem-se:

- Taxa de variação da declividade para adotar curva vertical;
- Requisitos para o emprego de curva de concordância;
- Comprimento mínimo;
- Distância entre pontos de interseção vertical (PIV).

Para as curvas horizontais tem-se:

- Raio mínimo para evitar a adoção de curva de transição;
- Valor da aceleração centrífuga ativa para conforto e segurança;
- Coeficiente de segurança;
- Excentricidade máxima;
- Superelevação máxima;
- Superlargura;
- Raio mínimo.

Para as tangentes tem-se:

- Tangente entre curvas reversas;
- Taxa de dormentação recomendada;
- Perfil do trilho;
- Rampa máxima compensada.

Com a determinação completa do tipo de análise, o sistema seleciona os dados de entrada relevantes, que são apresentados ao usuário através de formulários de interface para serem preenchidos.

3.4.2 Entrada de dados

A entrada de dados é a etapa em que todos os dados do problema devem ser inseridos. A entrada de dados é dividida em dois tipos: dados da composição, dados da ferrovia. Essa entrada é bem simples e ocorre através do preenchimento de formulários específicos, e no caso dos dados da geometria, ocorre apenas indicando qual alinhamento será analisado.

3.4.2.1 Dados da composição

Os dados da composição são necessários para realizar os cálculos que garantem a segurança do conjunto ao percorrer a via ferroviária, sendo eles:

- Altura do centro de gravidade (CG);
- Deslocamento do CG;
- Distância entre face externa do friso;
- Raio da roda;
- Diâmetro da roda;
- Altura do friso;
- Espessura do friso;
- Base rígida do truque.

3.4.2.2 Dados da linha férrea

Os dados da linha férrea se referem à geometria e à superestrutura da via, assim como alguns dados de operação.

Geometria

Os dados da geometria são os dados referentes ao alinhamento e perfil da estrada de ferro. A análise das normas ocorre em função de suas características e gera resultados indicando se essa geometria está de acordo com o esperado para que o material rodante percorra a via com segurança.

A forma de entrada dos dados geométricos pode ocorrer por pontos georreferenciados ou por elementos geométricos horizontais e verticais (tangentes, curvas e curvas de transições) do alinhamento da via com as suas variáveis indicadas (raio de curva, comprimento, etc.) ordenados na sequência de ocorrência da via.

Caso a entrada dos dados de geometria seja apenas por pontos georreferenciados, deve-se utilizar uma metodologia complementar de reconstrução de alinhamento por pontos, que transforma todos os pontos georreferenciados em pontos geométricos de alinhamento horizontal e vertical, sendo capaz de recriar os elementos de tangente horizontal, tangente vertical, curvas vertical, curva circular e curva de transição, além de obter o valor de suas variáveis. A metodologia complementar para reconstrução dos pontos pode ser resumida em:

- Transformar pontos no plano em alinhamento horizontal com tangentes horizontais, curvas circulares e curvas de transição;
- Transformar pontos no espaço em perfil do alinhamento com tangentes verticais e curvas verticais.

Operação

Na operação, apenas a velocidade de projeto é requisitada. Essa velocidade tem relação direta com o equilíbrio da composição.

Superestrutura

Os dados de superestrutura são:

- Bitola da via;
- Perfil do trilho;
- Padrão de qualidade da superestrutura;
- Largura do dormente;

- Faixa de socaria;
- Distância entre dormentes;
- Carga estática por roda.

3.4.3 Interpretação dos dados

A partir da entrada de dados deve-se relacionar as normas selecionadas e os tipos de análise com os outros dados de entrada, criando as regras de checagem.

3.4.3.1 Elementos que deverão ser verificados

Os elementos a serem verificados dependem do tipo de análise e dos parâmetros selecionados.

3.4.3.2 Limites para cada variável

Os limites de cada variável são extraídos das normas ou especificações selecionadas.

3.4.4 Execução da checagem

Com as regras de checagem e com os dados de entrada é possível analisar todos os elementos selecionados, devendo cada elemento ser analisado separadamente e todos os cálculos necessários para o tipo de elemento serem realizados.

Após a realização dos cálculos, comparam-se os valores obtidos com os valores de referência das normas selecionadas e, em caso de alguma irregularidade, o elemento deve ser marcado como irregular, sendo o resultado de cada cálculo armazenado para que futuramente seja exibido.

É importante que cada elemento seja organizado através da ordem de ocorrência na via e para tal deve ser criado um código de identificação global e local. O código global inter-relaciona todos os elementos e o código local relaciona apenas elementos do mesmo tipo.

3.4.4.1 Checagem do alinhamento horizontal

Análise da taxa de dormentação e do perfil do trilho

A taxa de dormentação e o perfil do trilho estão correlacionados, uma vez que quanto maior for a distância entre os dormentes maior será o momento máximo atuante nos trilhos e conseqüentemente mais resistente deverá ser o perfil do trilho.

Para determinar o momento máximo atuante no trilho deve-se calcular alguns coeficientes que serão utilizados no cálculo do momento máximo atuante no trilho, a saber:

- Coeficiente dinâmico (Cd);
- Coeficiente de dormente (D);
- Coeficiente de lastro (C);
- Coeficiente de superestrutura (Y).

Para o cálculo do momento máximo atuante no trilho deve-se determinar a taxa de dormentação, escolher um perfil de trilho e selecionar o maior dos momentos obtidos pelas seguintes proposições:

- Momento de Zimmerman simplificado 1ª hipótese;
- Momento de Zimmerman simplificado 2ª hipótese.

Após determinar o momento máximo atuante, o perfil do trilho será rejeitado ou aceito, de acordo com a tensão máxima admissível adotada, sendo calculado o momento resistente (W) mínimo que o perfil do trilho deve possuir. Caso o momento resistente do trilho seja muito maior que o momento resistente mínimo, a análise deverá ser refeita adotando um perfil mais econômico.

Análise de tangentes

A análise da tangente do alinhamento horizontal leva em consideração os valores recomendados para o comprimento mínimo de tangente entre curvas simples e curvas reversas.

Análise de curvas circulares

Para realizar a análise das curvas circulares, inicialmente, calcula-se o valor de variáveis que serão utilizadas nos cálculos:

- Distância de centro a centro dos trilhos (B);
- Aceleração centrífuga não-equilibrada (Ya);
- Jogo da via (ff);
- Base rígida afetada (u).

Depois é feito o cálculo dos valores ideais para cada variável:

- Superelevação máxima;
- Excentricidade resultante;
- Velocidade máxima conforto;
- Velocidade máxima de segurança
- Velocidade mínima;
- Sobrecarga;
- Superlargura;
- Raio mínimo.

Além desses valores, é calculado o valor da velocidade máxima considerando as condições atuais da geometria da via.

Análise de curvas de transição

As curvas circulares devem ser examinadas para determinar se há a necessidade de uma curva de transição a acompanhando e, para isso, deve-se observar o raio mínimo para não haver transição. Caso o raio da curva circular seja maior que o raio mínimo, será obrigatória a presença de uma curva de transição, dessa forma, deve-se calcular o comprimento mínimo de transição e a rampa de superelevação a ser adotada.

3.4.4.2 Checagem do alinhamento vertical

A checagem do alinhamento vertical é separada em duas partes: análise da inclinação da tangente e das curvas verticais. É uma análise mais simples que a do alinhamento horizontal, porém possui a mesma importância.

Inclinação da tangente

Deve-se analisar a inclinação máxima permitida pela norma e a inclinação apresentada em projeto.

Curvas verticais

As curvas verticais devem ser analisadas quanto à distância entre PIV's e à necessidade do emprego de curva de concordância vertical.

3.4.5 Exibição dos resultados

A exibição dos resultados deve conter as informações necessárias para identificar as irregularidades, além de apresentar as recomendações para correção. É possível exibir os resultados de duas formas, uma resumida e outra detalhada. A forma resumida serve para que o usuário possa ter uma visão geral dos resultados e para isso os resultados são exibidos de forma consolidada. A forma detalhada serve para que o usuário veja todas as características e comentários de um trecho, assim como a sua característica geométrica, que deve ser focada na tela.

3.4.5.1 Resultados consolidados

Tabela com resultados gerais

A tabela com resultados gerais serve para se ter um resumo de fácil visualização de todos os cálculos realizados, sendo que apenas as informações mais relevantes para cada elemento analisado devem ser exibidas. Esse tipo de visualização possibilita também que o usuário utilize filtros para visualizar apenas o que deseja. Os filtros podem selecionar apenas os trechos com erros ou com advertências e ainda limitar a visualização dos resultados a apenas os parâmetros de interesse do usuário.

Tabela contendo apenas irregularidades

A tabela geral contendo apenas irregularidades mostra as mesmas informações que a tabela dos resultados gerais, excluindo os trechos em que não há irregularidade. Essa tabela concentra apenas informações sobre pontos que precisam ter maior atenção.

3.4.5.2 Resultados individuais

Os resultados individuais mostram informações detalhadas de cada trecho. O foco desse modo de exibição de análise de um trecho específico é o detalhamento da sua geometria e suas principais características, facilitando a visualização dos resultados e a compreensão das alterações necessárias dos parâmetros incorretos do trecho. Nesse tipo de exibição de resultados é importante ressaltar a fonte utilizada para cada checagem realizada.

4 DESENVOLVIMENTO

O capítulo do desenvolvimento mostrará a aplicação da metodologia criada com a criação de um protótipo computacional no AutoCAD Civil 3D. O aplicativo desenvolvido para a realização do *code-checking* ferroviário analisa a configuração geométrica da linha de trem de acordo com as normas aplicáveis a cada caso.

O *framework* do *Microsoft Visual Studio* (MVS 2015 RC) foi utilizado no ambiente de programação .NET utilizando a linguagem de programação C#. O protótipo foi desenvolvido para ser executado como um *plug-in* do *software* AutoCAD Civil 3D. O protótipo criado foi chamado de RailBIM.dll, que foi projetado com as referências da API do Civil 3D. A API Civil 3D consiste em bibliotecas C#, que podem ser usadas para personalizar o ambiente gráfico Civil 3D, permitindo o acesso a funcionalidades e características de entidades existentes e até mesmo permitindo a modificação e criação de entidades.

4.1 Acesso a API do Civil 3D

A criação do protótipo deste trabalho conta com o desenvolvimento de um aplicativo associado ao Civil 3D, que executará a checagem automática de normas. Isso é possível por meio do acesso da API .NET do Civil 3D. O aplicativo desenvolvido utiliza os dados do projeto existente e alguns dados de entrada para realizar cálculos e comparar com definições normativas, com o objetivo de exibir os resultados para o usuário em uma tabela criada dentro do Civil 3D.

Para acessar a API do Civil 3D utilizando o *Microsoft Visual Studio* deve-se criar um projeto do tipo *Class Library* e adicionar as referências das bibliotecas específicas do AutoCAD e do Civil 3D dentro desse projeto (*acdbmgd.dll*; *acmgd.dll*; *accoremgd.dll*; *AecBaseMgd.dll* e *AeccDbMgd.dll*). Essas bibliotecas podem ser acessadas através dos códigos criados no projeto do *Visual Studio*, possibilitando a interação entre o programa desenvolvido com um projeto do Civil 3D.

Para acessar ou modificar um elemento em um projeto no Civil 3D através da programação no *Visual Studio* é necessário criar um gerenciador de transação no código, (*Autodesk.AutoCAD.DatabaseServices.TransactionManager*), dentro desse gerenciador pode-se inserir os códigos específicos para cada tarefa desejada. No caso desse trabalho, será

necessário que os dados do alinhamento e do perfil sejam acessados, para isso, deve-se primeiramente descobrir qual alinhamento do projeto do Civil 3D será analisado. Para possibilitar que o usuário escolha o alinhamento desejado cria-se, através de códigos, um novo *PromptEntityOptions* que aceite apenas a seleção do tipo *Alignment* e que armazene o alinhamento selecionado em uma variável. Ao selecionar esse alinhamento é possível descobrir o perfil relacionado ao mesmo e armazená-lo em outra variável.

O alinhamento é separado em elementos do tipo tangente, curva horizontal e curva horizontal com transição, cada tipo de elemento tem uma forma específica de acessar seus parâmetros então deve-se criar um bloco condicional que executará diferentes ações para cada tipo de elemento. No caso dos elementos tangente o único parâmetro de interesse é o seu comprimento; nos elementos de curva horizontal os parâmetros de interesse são: raio da curva e comprimento; nos elementos de curva horizontal com transição tem-se 3 elementos embutidos, são eles: duas transições e uma curva horizontal, das transições o principal parâmetro é o seu comprimento.

O perfil possui elementos do tipo PIV, cada PIV é dividido em três elementos: tangente anterior, curva vertical, tangente seguinte. As tangentes possuem como parâmetro a inclinação e a curva vertical possui como parâmetro o seu comprimento.

Além de acessar as informações dos elementos do projeto no Civil 3D será necessário criar algumas janelas para entrada de dados e para a exibição de resultados dentro do Civil 3D, para isso utiliza-se a classe *System.Windows.Forms*, que possibilita a criação de janelas de forma simples, mediante a inserção dos elementos (caixas de texto, rótulos, etc) desejados diretamente no layout da janela, conforme a Figura 3.1.

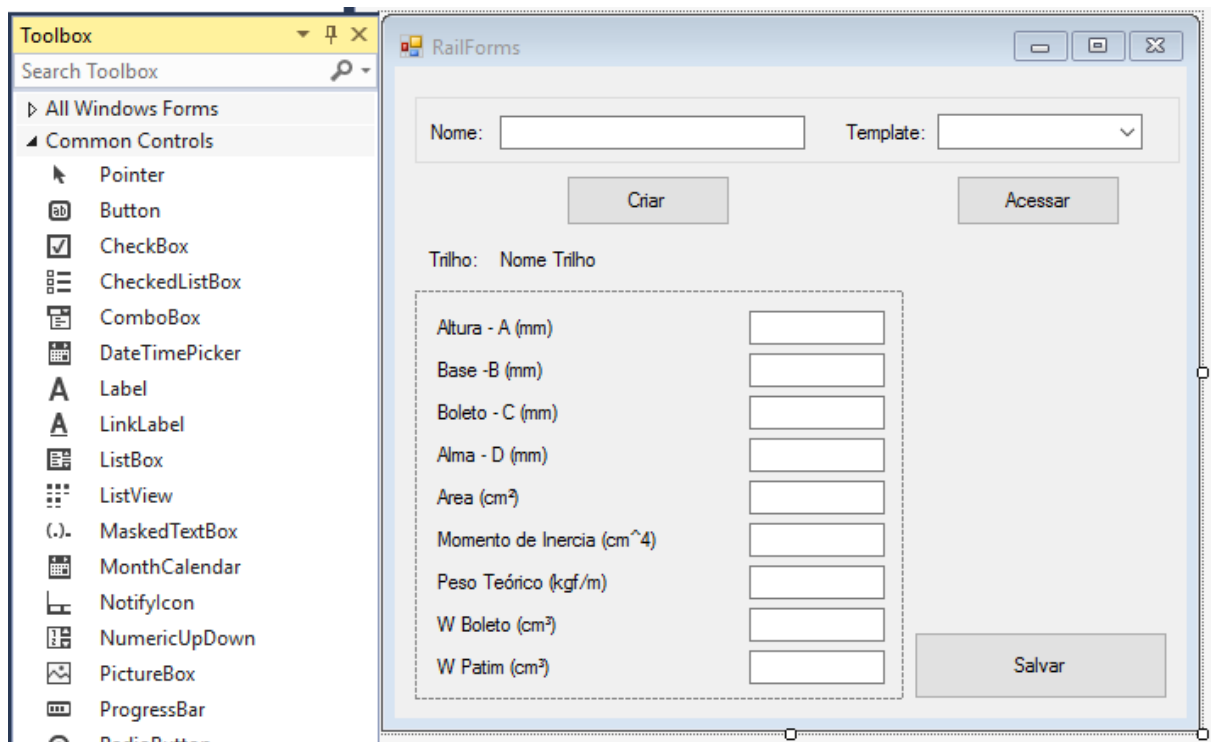


Figura 4.1: Criação de janelas através do Microsoft Visual Studio

4.2 Programação do sistema

O sistema foi criado para ser executado através de uma classe principal (*Main*), essa classe é auxiliada por outras classes que representam cada elemento do alinhamento, do perfil, da infraestrutura ferroviária e das normas assim como outras classes responsáveis pela criação das janelas de interface com o usuário, que possibilitam a entrada de dados.

Cada tipo de elemento do alinhamento e do perfil possui suas classes e cada objeto criado a partir dessas classes realizam todas as operações relativas ao seu tipo de elemento além de já realizar a checagem dos erros e deixar pronta a mensagem de interação com o usuário (mensagens de alerta e erro). São classes dos elementos do alinhamento:

- *Horizontal Curve*
- *PIV*
- *Tangent*
- *Transition*
- *Transition Curve*

Os elementos da infraestrutura ferroviária e normas servem para armazenar os dados de entrada e para possibilitar que esses dados sejam um objeto das classes dos elementos do alinhamento. São classes dos elementos da infraestrutura e normas:

- *Rail*
- *Railway*
- *RollingStock*
- *Standard*

As classes responsáveis pela criação das janelas de interface com o usuário são:

- *RailForms*
- *RailwayForms*
- *RollingStockForms*
- *StandardsForms*
- *AnalysisForms*
- *Parameters*
- *GlobalResults*
- *LocalResults*

A classe *Main* é responsável pela operação do sistema projetado, ela realiza o controle das janelas de interface exibidas ao usuário além de fazer o processamento dos dados inseridos pelo usuário. Ela cria novos objetos de classe que representam os elementos do alinhamento e do perfil em uma lista. Ao ser criado, cada objeto já realiza todas as operações relativas ao seu tipo de elemento e armazena os resultados em variáveis. Quando todos os objetos do alinhamento e do perfil são criados procede-se para a exibição dos resultados, onde a lista de objetos é passada para uma lista de resultados na qual os parâmetros de interesse de cada objeto são listados. A lista de resultados pode ser do tipo global ou do tipo local, e através de filtros pode-se exibir apenas objetos do mesmo tipo ou apenas objetos que apresentem erros.

4.3 Síntese do protótipo

O protótipo elaborado possui uma janela principal para a realização da determinação do tipo de análise e para a entrada de dados. Com os dados preenchidos, o usuário deve indicar qual alinhamento será analisado e, com o alinhamento selecionado, o protótipo realiza, para

cada elemento do alinhamento e do perfil, todos os cálculos citados na metodologia e compara os resultados com os limites aplicáveis na norma selecionada. Posteriormente uma tabela com os resultados gerais é aberta, possibilitando que seja visto o resultado de todos os trechos do alinhamento analisado. Para visualizar os resultados individuais deve-se abrir o menu que leva aos resultados individuais e navegar entre as entidades do alinhamento.

O sistema fornece uma interface simples e amigável para que os usuários realizem a determinação do tipo de análise e preencham o formulário de entrada de dados, conforme a Figura 4.2.

A interface de usuário, intitulada 'Análise', apresenta um layout organizado para a configuração de parâmetros. No topo, há um menu de idiomas e quatro abas principais: 'Via', 'Material Rodante', 'Normas' e 'Trilhos'. O formulário é dividido em seções para o tipo de análise, características da via, características do material rodante e características do suporte. O tipo de análise é selecionado por meio de botões de opção, com 'Carga' selecionado. As características da via incluem velocidade de projeto (40 km/h), bitola (Metric) e trilho (TR 57). As características do material rodante são definidas por campos de entrada de texto, com valores como altura do CG (1800 mm) e raio da roda (444.5 mm). As características do suporte incluem largura dormente (20 cm) e carga estática por roda (20 tf). Botões para 'Iniciar Análise' e 'Cancelar' estão localizados na parte inferior direita.

Seção	Parâmetro	Valor
Tipo de análise	VALEC	<input type="checkbox"/>
	DNIT	<input type="checkbox"/>
	CBTU	<input type="checkbox"/>
	AREMA	<input type="checkbox"/>
Características da Via	Velocidade de Projeto (V*) - km/h	40
	Bitola (b)	Metric
	Trilho*	TR 57
Características do material rodante	Altura do CG (H) - mm	1800
	Deslocamento do CG (d) - mm	100
	Distância entre face externa do friso (f) - mm	958
	Raio da Roda (r) - mm	444.5
	Diâmetro da roda até o friso (D) - mm	914
	Altura do Friso (m) - mm	25
	Espessura do Friso (e) - mm	30
Características Suporte	Largura dormente - cm	20
	Faixa de socaria - cm	70
	Distância entre dormentes (a) - cm	57
	Carga estática por roda - tf	20

Figura 4.2: Entrada de dados

4.4 Determinação do tipo de análise

O usuário deve escolher o tipo de análise desejada e definir os parâmetros que serão considerados na checagem das normas. As normas da VALEC, DNIT, CBTU e AREMA já

estão preenchidas e são facilmente selecionadas através do menu principal da análise. As normas para realização do *code-checking* possuem diretrizes para cada tipo de elemento, sendo eles: curvas de transição, curvas verticais, curvas horizontais e tangente.

O protótipo possibilita a edição de uma norma separando os elementos em abas, com o intuito de facilitar a visualização e impedir que variáveis de um elemento sejam confundidas com variáveis de outro elemento.

Para selecionar os parâmetros que serão considerados na checagem das normas, o botão “parâmetros” deve então ser acionado para abrir uma nova janela (Figura 4.3) que possibilita marcar os parâmetros desejados para a análise das normas.

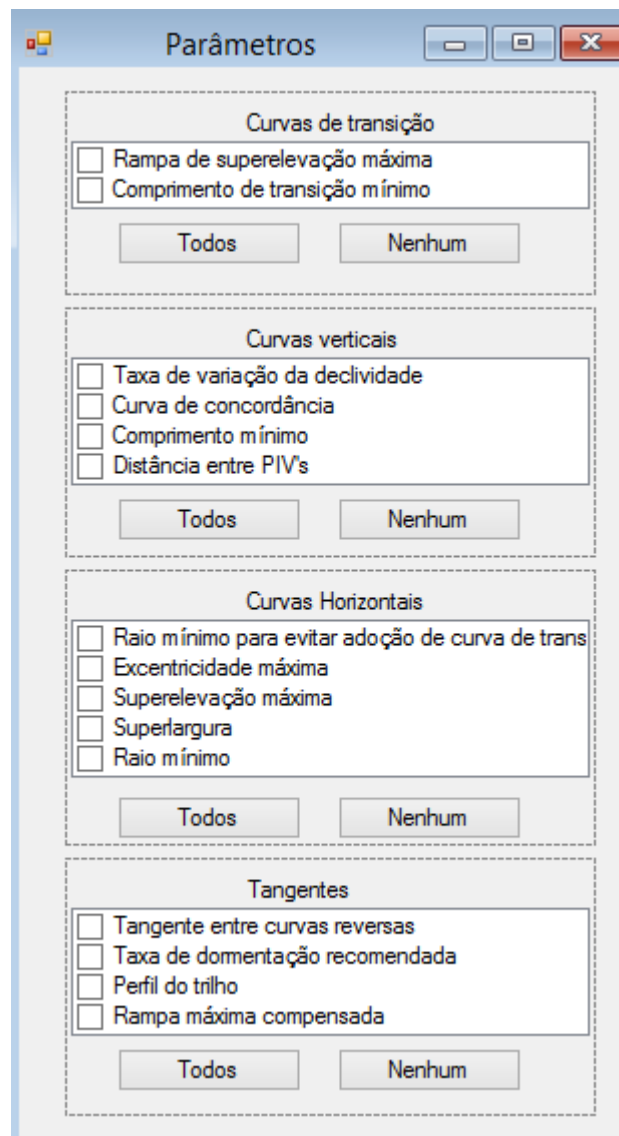


Figura 4.3: Parâmetros para análise

Depois de escolher o tipo de análise, os campos para entrada de dados dos equipamentos rodantes e da ferrovia são atualizados automaticamente, tornando visíveis para preenchimento só os campos entrada de dados requeridos para o tipo de análise escolhida.

4.4.1 Criação e alteração de normas

As especificações de normas podem ser alteradas ou criadas a partir de um menu específico. Para realizar esse procedimento o usuário deve preencher os campos de cada tipo de elemento com o valor indicado na norma. A Figura 4.4 mostra a aba relativa à edição dos parâmetros normativos do elemento Tangente, a Figura 4.5 mostra a do elemento Curva Horizontal, a Figura 4.6, da Curva Vertical e a Figura 4.7, da Transição.

A imagem mostra a janela de software 'Normas' com o seguinte conteúdo:

- Título da janela: Normas
- Nome: VALEC
- Template: [dropdown menu]
- Norma: DNIT
- Botões: Criar, Acessar
- Abas: Transição, Curva Vertical, Curva Horizontal, Tangente (selecionada)
- Campos de entrada e descrições:
 - 30 Tangente mínima entre curvas reversas (m)
 - 0 Taxa de documentação recomendada (domentes/km)
 - TR-57 Perfil recomendado
 - 0,6 Rampa máxima compensada (%)
- Botão Salvar

Figura 4.4: Edição de normas - Tangente

Nome: VALEC Template: ▼

Norma: DNIT

Transição Curva Vertical **Curva Horizontal** Tangente

2291,84	Raio mínimo para evitar adoção de curva de transição (m)
1718,88	Raio mínimo para evitar a adoção de superelevação (m)
5	Coeficiente de segurança
0	Excentricidade máxima (mm)
16	Superelevação máxima (cm)
343,83	Raio mínimo (m)
0,65	Valor da aceleração centrífuga ativa para conforto e segurança (m/s ²)

Figura 4.5: Edição de normas – Curva Horizontal

Nome: VALEC Template: ▼

Norma: DNIT

Transição **Curva Vertical** Curva Horizontal Tangente

0,2	Taxa de variação da declividade para adotar curva vertical (%)
60	Comprimento mínimo (m)
2000	Distância entre pontos de interseção vertical (PIV)

Figura 4.6: Edição de normas – Curva Vertical

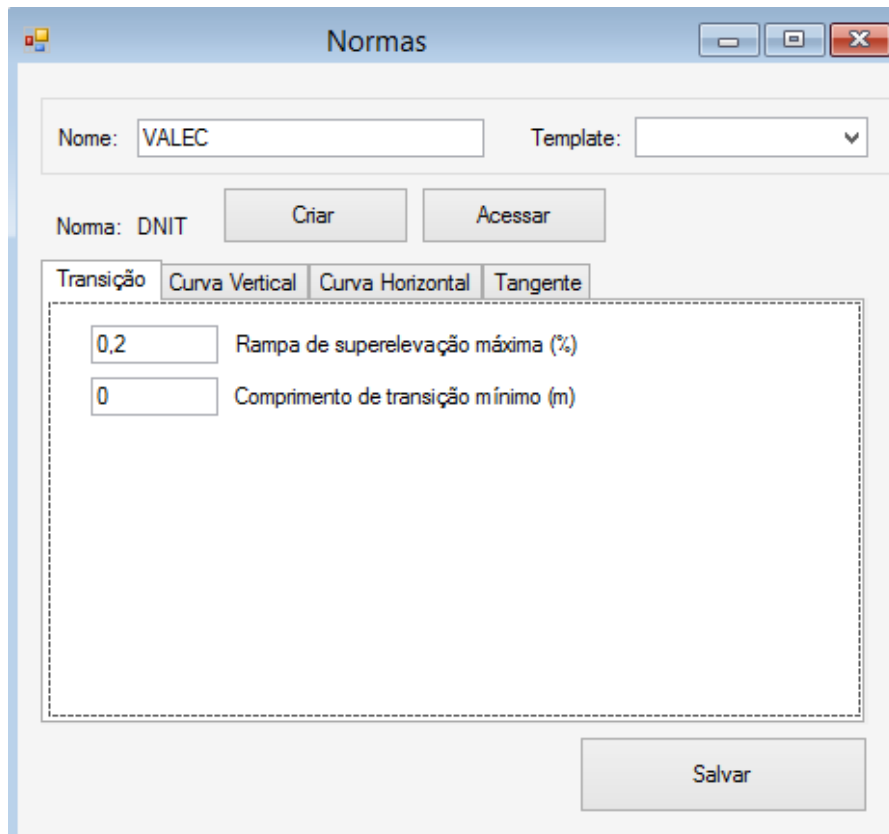


Figura 4.7: Edição de normas - Transição

4.5 Entrada de dados

Os dados de entrada são divididos em dois subconjuntos: dados da composição e dados da linha férrea, conforme o esquema indicado na Figura 4.8.

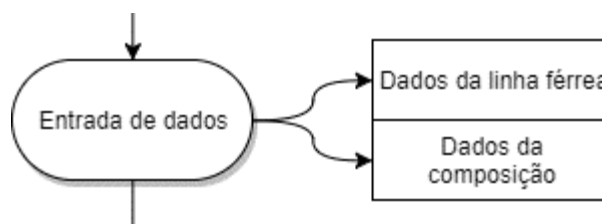


Figura 4.8: Etapa da entrada de dados

A entrada de dados é realizada por uma janela geral específica, conforme já mostrado na Figura 4.2.

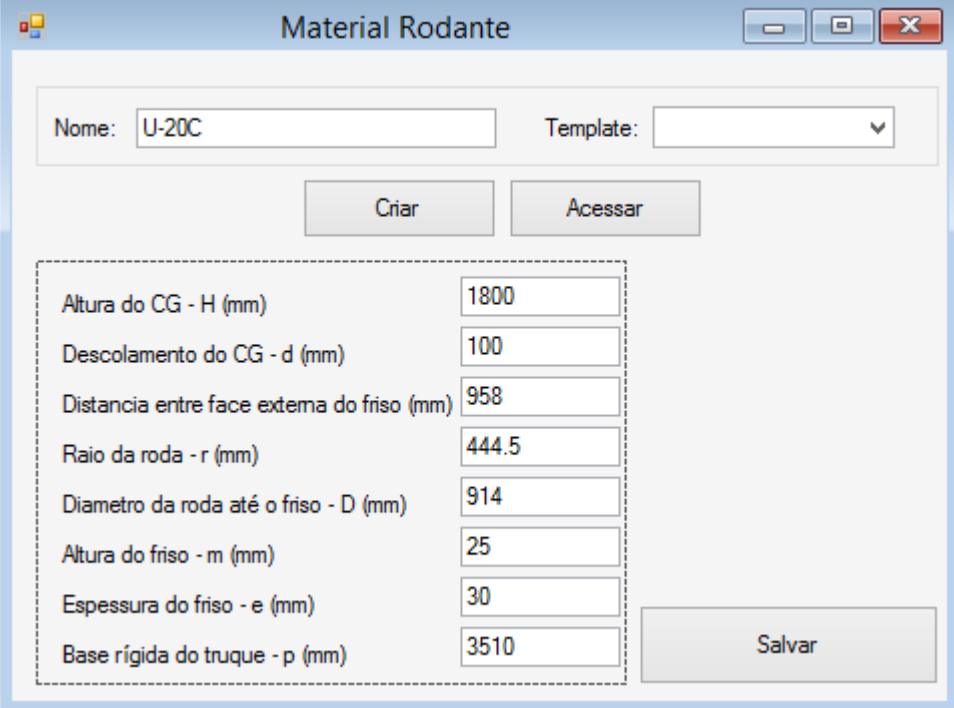
Para facilitar o uso do protótipo, será possível salvar e editar dados de um subconjunto, de forma que o preenchimento dos dados seja mais rápido. Será possível também inserir os dados individuais em caso de pequenas alterações para realização de testes em condições diferentes.

Os dados de entradas são armazenados em classes criadas para cada subconjunto e os detalhes sobre cada subconjunto serão vistos a seguir.

4.5.1 Dados da composição

Os dados da composição podem ser editados e gravados no sistema pela janela exibida na Figura 4.9. Esses dados ficam armazenados em um objeto criado a partir da classe *RollingStock*, cuja tradução é material rodante. Essa classe possui variáveis do tipo *double* para armazenar cada um dos dados inseridos, e a correspondência entre o nome de cada dado e o nome da variável é:

- Altura do CG = H;
- Deslocamento do CG = d;
- Distância entre face externa do friso = ff;
- Raio da roda = r;
- Diâmetro da roda = D;
- Altura do friso = m;
- Espessura do friso = thickness;
- Base rígida do truque = p.



The screenshot shows a software window titled "Material Rodante". At the top, there are standard window controls (minimize, maximize, close). Below the title bar, there are two input fields: "Nome:" with the value "U-20C" and "Template:" with a dropdown arrow. Below these are two buttons: "Criar" and "Acessar". The main area contains a table of parameters with input fields, enclosed in a dashed border. The parameters and their values are:

Altura do CG - H (mm)	1800
Descolamento do CG - d (mm)	100
Distancia entre face externa do friso (mm)	958
Raio da roda - r (mm)	444.5
Diâmetro da roda até o friso - D (mm)	914
Altura do friso - m (mm)	25
Espessura do friso - e (mm)	30
Base rígida do truque - p (mm)	3510

At the bottom right of the parameter table area is a "Salvar" button.

Figura 4.9: Entrada de dados da composição

4.5.2 Dados do perfil do trilho

Os trilhos comuns do padrão TR já estão cadastrados no protótipo, porém, caso seja necessário utilizar um trilho diferente, o usuário pode cadastrar novos trilhos através do menu da Figura 4.10, inserindo o nome e os parâmetros do novo trilho.

Trilho:	Nome Trilho
Altura - A (mm)	168.28
Base - B (mm)	139.7
Boleto - C (mm)	69.06
Alma - D (mm)	15.88
Area (cm ²)	56.90
Momento de Inercia (cm ⁴)	72.56
Peso Teórico (kgf/m)	2730.48
W Boleto (cm ³)	297
W Patim (cm ³)	360.52

Figura 4.10: Edição do perfil metálico do trilho

4.5.3 Dados da linha férrea

Os dados da linha férrea podem ser editados e gravados no sistema pela janela exibida na Figura 4.11. Esses dados ficam armazenados em um objeto criado a partir da classe *Railway*, a qual possui variáveis do tipo *double* para armazenar cada um dos dados numéricos inseridos, do tipo *bool* para indicar se a via tem um suporte de alto padrão e do tipo *Rail* para indicar o trilho da via. A correspondência entre o nome de cada dado e o nome da variável é:

- Velocidade = *speed*;
- Faixa de socaria = *tamping*;
- Coeficiente de lastro = *ballastCoefficient*;
- Coeficiente de dormente = *sleeperCoefficient*;
- Coeficiente de superestrutura = *superstructureCoefficient*;

- Largura do dormente = *sleeperWidth*;
- Distância entre dormentes = *sleeperDistance*;
- Bitola = *gauge*;
- Trilho = *rail*;
- Suporte de alto padrão = *highStandard* (tipo *bool*).

Figura 4.11: Edição dos dados da linha férrea

4.5.4 Escolha do alinhamento

Com todos os dados de entrada preenchidos, o protótipo pede para o usuário selecionar o alinhamento diretamente no Civil 3D, conforme a Figura 4.12. O alinhamento selecionado é armazenado em uma variável do tipo *Alignment*. Caso esse alinhamento tenha um perfil vertical vinculado, o protótipo o encontra e o armazena em uma variável do tipo *Profile*. Em seguida o protótipo já está apto a realizar os cálculos necessários para a checagem das normas.

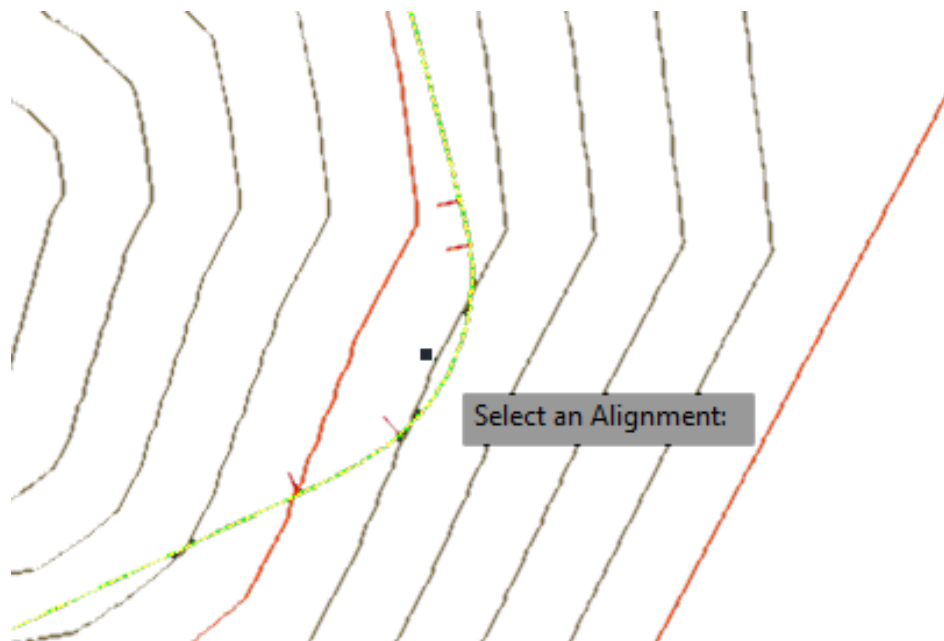


Figura 4.12: Seleção do alinhamento

4.6 Interpretação dos dados e execução da checagem

Essa etapa ocorre quando todos os dados de entrada já foram inseridos e o alinhamento foi selecionado. Inicialmente divide-se o alinhamento e o perfil em elementos (curva simples, curva de transição e tangente horizontal para o alinhamento e PIV para tangente vertical e curva vertical do perfil). Para cada elemento é criada uma instância de classe vinculada ao tipo de elemento. Dentro de cada instância realizam-se os cálculos apropriados ao tipo de classe. Para isso, a instância precisa ter acesso a todos os dados de entrada e também às características geométricas do elemento analisado, por exemplo, uma classe para curva horizontal necessita ter acesso ao raio da curva e outros parâmetros.

Todas as classes possuem atributos em comum, os quais são os dados de entrada realizados anteriormente. São eles:

- *RollingStock;*
- *Rail;*
- *Standard;*
- *Railway.*

4.6.1 Curvas horizontais

Para as curvas horizontais do alinhamento é criada uma instância do tipo *HorizontalCurve*. Esse tipo de classe possui, além dos comuns, os seguintes atributos:

- Jogo da via – j
- Raio da curva – R
- Distância de centro a centro dos trilhos – B
- Possui transição? – transition

As variáveis, que são os resultados dos cálculos realizados, são:

- Superelevação teórica – ht
- Superelevação de segurança – hpseg
- Superelevação prática – hp
- Superelevação adotada – há
- Superelevação excentricidade – hpe
- Excentricidade – x
- Superelevação máxima – hmax
- Velocidade máxima de segurança – VmaxSeg
- Velocidade máxima de conforto – VmaxConf
- Velocidade máxima com condições atuais – VMaxAtual
- Velocidade máxima com raio alterado – VmaxNovo
- Tempo de percurso – tempo
- Comprimento da curva – comprimento
- Velocidade mínima – Vmin
- Peso sobre trilho interno – pi
- Peso sobre trilho externo – pe
- Superlargura – S
- Raio mínimo escorregamento – Rmin1
- Raio mínimo inscrição – Rmin2
- Raio mínimo inscrição intermediária – Rmin3
- Raio mínimo inscrição livre – Rmin4
- Raio mínimo velocidade – Rmin5

4.6.2 Curva de transição

Como uma curva de transição possui uma primeira transição, seguida de uma curva horizontal e de outra transição, a classe de Curva de Transição pode ser considerada como uma classe especial, pois ela incorpora duas classes compostas, a classe das Curvas Horizontais e a classe da Transição.

A classe de Curva Horizontal tem as mesmas características citadas anteriormente e, nesse caso, o atributo “Possui transição” será marcado como verdadeiro para que nos resultados seja possível fazer a distinção das curvas horizontais com e sem transição.

A classe Transição possui atributos:

- Primeira – *first* (para indicar se é a primeira ou segunda transição);
- Comprimento – *length*;
- Superelevação – *hp*;
- Rampa de superelevação – *cantRamp*.

4.6.3 Tangente horizontal

A classe de tangente horizontal possui apenas o comprimento como atributo.

4.6.4 Tangente vertical e curvas verticais

A tangente vertical e a curva vertical são inseridas em uma mesma classe com o nome de PIV. Essa classe possui os seguintes atributos:

- Grade entrada – *gradeIn*;
- Grade saída – *gradeOut*;
- Distância ao último PIV;
- Distância ao próximo PIV;
- Mudança de grade – *gradeChange*;
- Possui curva vertical – *hasCurve*;
- Comprimento – *length*;

4.7 Exibição dos resultados

Com todos os cálculos realizados e com a checagem das normas feita pode-se exibir os resultados de forma consolidada ou individual.

Na forma de tabela consolidada, as informações mostradas podem ser filtradas por tipo de elemento ou por elementos que apresentam erros ou alertas. A Figura 4.13 mostra as informações em uma tabela consolidada sem a aplicação de qualquer filtro. Nela, pode-se ver que os elementos que apresentam erro são marcados com um símbolo vermelho, de maneira visível para o usuário identificar os trechos com erros. Ao passar o *mouse* por cima dos símbolos de erro, um *tooltip* (uma pequena janela flutuante com informações úteis) aparece para o usuário indicando quais erros o elemento possui, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.13: Resultados – Tabela consolidada

Figura 4.14: *Tooltip* sobre o erro em um elemento

Na forma de tabela com dados individuais, os dados do elemento são exibidos de forma separada, enquanto a janela de visualização do Civil 3D é focada no elemento selecionado para facilitar a realização de alguma alteração nesse elemento. Esse tipo de visualização também permite mostrar, com o mesmo símbolo da tabela consolidada, se o elemento possui algum erro, e da mesma forma é possível abrir a *tooltip* ao passar o *mouse* por cima do símbolo. A Figura 4.15 mostra como é a tabela de dados individuais.

The screenshot shows a software window titled "Dados do Objeto Selecionado" with a standard Windows interface (minimize, maximize, close buttons). At the top, there are navigation buttons (back, forward) and a page indicator "1 of [0]". The main area is divided into three sections, each enclosed in a dashed border:

- Tipo: PIV**: Contains 10 input fields for parameters such as "Inclinação (%)", "Comprimento (m)", "Taxa de variação (%)", "Distancia PIV anterior (m)", "Distancia PIV seguinte (m)", "Distancia PIV mínima (m)", "Superelevação (cm)", "Superelevação Máxima (cm)", "Superfargura (cm)", "Comprimento (m)", "Excentricidade (cm)", and "Contra-trilho (cm)".
- Tipo: Primeira transição**: Contains 4 input fields for "Comprimento (m)", "Comprimento mínimo (m)", and two instances of "Rampa de superelevação (mm/m) máxima".
- Tipo: Segunda transição**: Contains 4 input fields for "Comprimento (m)", "Comprimento mínimo (m)", and two instances of "Rampa de superelevação (mm/m) máxima".

Figura 4.15: Resultados – Tabela individual

4.8 Contribuições adicionais não tratadas pelas versões comerciais analisadas

O AutoCAD Civil 3D assim como outros programas para desenvolvimento de projetos ferroviários possuem uma ferramenta para realizar a análise de normas nos projetos, porém elas são limitadas a poucos parâmetros e não incluem todas as considerações de projeto necessárias. O protótipo desenvolvido neste trabalho apresenta características extras que incluem todas as considerações normativas de projeto geométrico ferroviário e que não são contempladas pelos softwares comerciais. A comparação das funcionalidades entre os softwares para desenvolvimento de projeto e o protótipo elaborado são expressas na Figura 4.16, onde *Rail Analysis* representa o protótipo desenvolvido.

	Autocad Civil 3D	Bentley Power Rail Track	Ferrovias CGS	Rail Analysis
Superelevação				
Superlargura				
Criação do alinhamento				
Criação do perfil				
Calculo terraplanagem				
Dimensionamento trilho				
Taxa de dormentação				
Raio mínimo				
Velocidade máxima				
Velocidade mínima				
Velocidade nas condições atuais				
Velocidade com parâmetros recomendados				
Contratrilhos				
Excentricidade				
Considerar raios para não ter superelevação/transição				
Comprimento transição				
Rampa de superelevação				
Comprimento de curvas verticais				
Máxima rampa				
Distância entre PIV				
Comprimento entre tangentes				
Seleção do critério				

Figura 4.16: Comparação de funcionalidades entre programas e protótipo

Apesar do protótipo ser criado para atuar apenas no AutoCAD Civil 3D, pode-se utilizar a metodologia para elaboração de protótipos para os outros *softwares* de projeto, além de também ser possível analisar um projeto elaborado em outro software através da importação do modelo de projeto para o AutoCAD Civil 3D e realizar a análise de normas no projeto importado.

O protótipo pode ser considerado como uma ferramenta BIM, visto que ele armazena novas informações aos elementos de projeto de forma organizada dentro do modelo único, além disso ele realiza um tratamento diferenciado da modelagem da informação, aplicando conceitos adicionais aos softwares de projeto existentes no mercado como mostrado na Figura 4.16.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo desenvolvido foi testado para validação em um trecho de 10 km da Ferrovia Centro-Atlântica (FCA). Essa ferrovia possui cerca de 7.897 km de extensão com a bitola métrica e é exclusiva para o transporte de cargas, sendo a velocidade média de percurso das composições de 22 km/hora.

Os dados geométricos para realização dos testes foram obtidos por meio da interpolação de pontos georreferenciados, os quais foram coletados pela câmara Lady Bug acoplada em um trem que percorreu a ferrovia em 2014 (Porto, 2014). Os pontos coletados estão no formato de coordenadas geográficas em graus decimais, porém, para realizar a aproximação manual desses pontos e transforma-los em alinhamento e perfil, é necessário que eles sejam transformados em coordenadas planas cartesianas com a projeção UTM, que utiliza a base métrica para dispor os pontos.

Os pontos foram transformados para coordenadas UTM com base no sistema geodésico de referência SIRGAS2000 23S. Com os pontos transformados, procedeu-se à importação dos pontos no AutoCAD Civil 3D e então foi criado um alinhamento e um perfil que mais se aproxima desses. O trecho analisado é exibido na Figura 5.1, com o realce do alinhamento a partir de um mapa do *Google Earth* e na Figura 5.2, que mostra o estaqueamento desse alinhamento. O ponto de referência desse trecho é o ponto com coordenadas (-19.96862333, -44.20364).



Figura 5.1: Alinhamento analisado

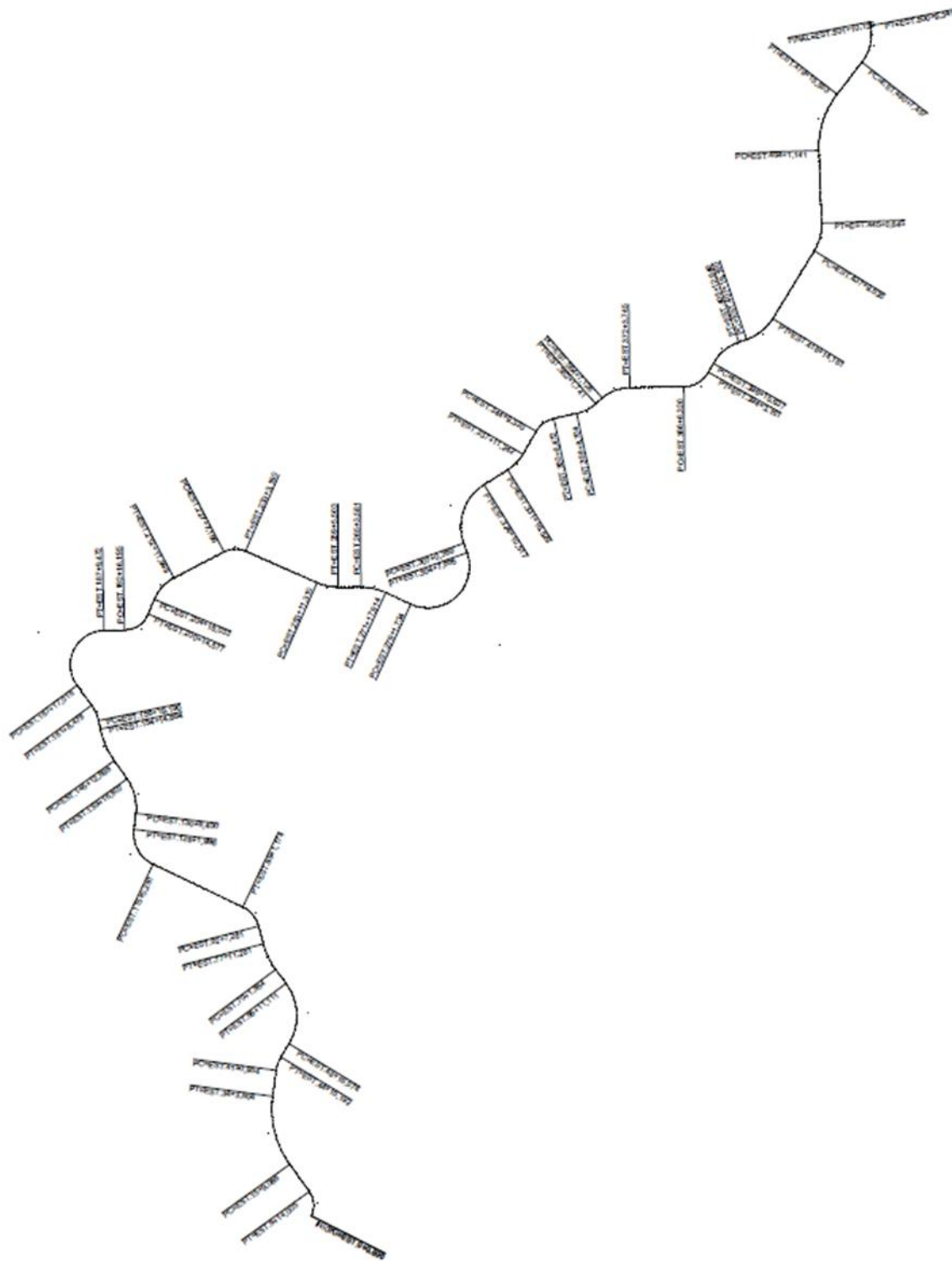


Figura 5.2: Estacas do alinhamento

A locomotiva mais utilizada nessa ferrovia é a do modelo U-20C, uma locomotiva diesel-elétrica fabricada pela G.E.B.S.A, que possui as seguintes características:

- Velocidade máxima = 103 km/h;
- Velocidade mínima contínua = 19 km/h;
- Raio mínimo de curva = 56,7 m;
- Diâmetro da roda medido até o friso = 914 mm;
- Raio da roda no plano de rolamento = 444,5 mm;
- Truque de três eixos com distância de 1594 mm e 1911 mm;
- Altura do Centro Geométrico (CG) em relação aos trilhos = 1,8 m;
- Distância entre as faces externas dos frisos = 958 mm;
- Altura do friso = 25 mm;
- Espessura do friso = 30 mm;
- Base rígida do veículo = 3,51 m.

Os dados referentes ao trilho e à via do trecho são:

- Bitola métrica;
- Superelevação máxima = 100 mm;
- Trilho perfil TR-57;
- Largura do boleto = 69 mm;
- Distância de centro a centro dos trilhos = 1,07 metros;
- Largura dormente = 20 cm;
- Distância entre dormentes = 57 cm;
- Faixa de socaria = 70 cm;
- Carga estática máxima por roda = 15.000 kgf.

Um dos testes de validação do sistema foi realizado para verificar a possibilidade de aumentar a velocidade dos trens de carga nesta rota. A velocidade média de projeto foi então definida como sendo de 60 km/h para realizar a análise automática pelo sistema desenvolvido. Os dados de entrada são preenchidos conforme a janela mostrada na Figura 5.3.

The screenshot shows the 'Análise' software interface with the following settings:

- Idioma:** Português
- Tipo de análise:**
 - VALEC
 - DNIT
 - CBTU
 - AREMA
 - Customizado
 - Carga
 - Passageiro
 - Misto
- Selecionar Material Rodante:** (Empty dropdown)
- Características do material rodante:**
 - Altura do CG (H) - mm: 1800
 - Deslocamento do CG (d) - mm: 100
 - Distância entre face externa do friso (f) - mm: 958
 - Raio da Roda (r) - mm: 444,5
 - Diâmetro da roda até o friso (D) - mm: 914
 - Altura do Friso (m) - mm: 25
 - Espessura do Friso (e) - mm: 30
 - Base Rígida do Truque (p) - mm: 3510
- Selecionar Via:** (Empty dropdown)
- Características da Via:**
 - Velocidade de Projeto (V)* - km/h: 60
 - Bitola (b): Metric
 - Trilho*: TR 57
- Características Suporte:**
 - Suporte de alto padrão
 - Largura dormente - cm: 20
 - Faixa de socaria - cm: 70
 - Distância entre dormentes (a) - cm: 57
 - Carga estática por roda - tf: 15
- Buttons:** Iniciar Análise, Cancel

Figura 5.3: Preenchimento dos dados de entrada

O resultado da análise do trecho selecionado pode ser visto na forma consolidada e na forma individual. Na Figura 5.4 os resultados das curvas horizontais são exibidos em forma consolidada, nela pode-se ver o resultado de todos os trechos analisados. Para verificar os trechos que limitam a velocidade máxima da via, o modo de filtro foi ativado para visualizar apenas as curvas horizontais e a ordenação dos resultados foi escolhida para ser por menor velocidade máxima possível, de acordo com a situação existente. Pode-se ver na primeira linha com entidade número 2 que o raio da curva é menor que o raio mínimo calculado e que a velocidade máxima é de 47 km/h, dessa forma, essa curva apresenta erros que devem ser verificados pelo projetista. Ao passar o *mouse* por cima do símbolo de erro nessa linha aparece uma mensagem de erro ao usuário, conforme a Figura 5.5.

Filtro									
<input type="checkbox"/> Erros	<input type="checkbox"/> Advertencia	<input checked="" type="checkbox"/> Curva Horizontal	<input type="checkbox"/> Curva Transição	<input type="checkbox"/> Curva Vertical	<input type="checkbox"/> Tangente				
Ero	Entidade	Tipo	Comprimento	Raio	Raio Mínimo - Norma	Raio mínimo - Calculado	Superelevação Máxima - Norma	Superelevação - Calculado	Superf
✖	2,00	Ho...	133,8	122,3	343,8	302,5	- 10,00	19,59	3,71
✖	4,00	Ho...	374,7	494,4	343,8	302,5	- 10,00	0,96	0,01
✖	6,00	Ho...	74,2	180,3	343,8	302,5	- 10,00	11,63	2,13
✖	8,00	Ho...	334,5	281,9	343,8	302,5	- 10,00	5,58	0,93
✔	10,00	Ho...	59,4	388,5	343,8	302,5	- 10,00	2,63	0,34
✖	12,00	Ho...	133,9	154,1	343,8	302,5	- 10,00	14,48	2,69
✖	14,00	Ho...	221,7	177,7	343,8	302,5	- 10,00	11,87	2,18
✖	16,00	Ho...	190,4	257,1	343,8	302,5	- 10,00	6,61	1,13
✖	18,00	Ho...	182,0	442,5	343,8	302,5	- 10,00	1,68	0,16
Dados Consolidado									
<input type="checkbox"/> Tangente	Resultados Individuais		Dados de Entrada		Perfil do trilho: TR57		✖		
					Taxa de dormentação: 1754		✔		
Superfargura	Velocidade de projeto	Velocidade máxima - Condições atuais	Velocidade máxima - Parâmetros recomendados	Velocidade mínima	Excentricidade	Raio mínimo para não haver transição			
3,71	60	47	74	27	18,69	2291,8			
0,01	60	60	94	0	18,69	2291,8			
2,13	60	57	74	33	18,69	2291,8			
0,93	60	60	74	14	18,69	2291,8			
0,34	60	60	84	NaN (Nã...	18,69	2292			
2,69	60	53	74	31	18,69	2291,8			
2,18	60	57	74	33	18,69	2291,8			
1,13	60	60	74	22	18,69	2291,8			
0,16	60	60	89	0	18,69	2291,8			

Figura 5.4: Velocidade máxima em cada curva

Ero	Entidade	Tipo	Comprimento	Raio	Raio Mínimo - Norma	Raio mínimo - Calculado	Superelevação Máxima - Norma	Superelevação - Calculado	Superfargura	Velocidade de projeto	Velocidade máxima - Condições atuais	Velocidade máxima - Parâmetros recomendados
✖	2,00	Ho...	133,8	122,3	343,8	302,5	- 10,00	19,59	3,71	60	47	74
<p>✖ O raio atual dessa curva é 122 metros e o raio mínimo calculado é de 302 metros. Aumente o raio dessa curva ou diminua a velocidade de projeto.</p> <p>✖ O raio atual dessa curva é 122 metros e o raio mínimo segunda a norma é de 343,83 metros. Aumente o raio dessa curva.</p> <p>✖ Essa curva precisa ter uma curva de transição.</p>												

Figura 5.5: Mensagem de alerta na entidade 24.

A análise das curvas verticais é exibida na Figura 5.6, nela pode-se ver que todos os trechos apresentam erros, devido a inclinação superior a inclinação máxima permitida pela norma, na Figura 5.7 pode-se ver a mensagem de erro que é informada ao usuário.

Filtro									
<input type="checkbox"/> Erros	<input type="checkbox"/> Advertencia	<input type="checkbox"/> Curva Horizontal	<input type="checkbox"/> Curva Transição	<input checked="" type="checkbox"/> Curva Vertical	<input type="checkbox"/> Tangente				
Erro	Entidade	Tipo	Comprimento	Inclinação	Inclinação máxima	Comprimento mínimo	Taxa de variação de greide	Distancia PIV anterior	Distancia PIV seguinte
✖	58,00	PIV	116	- 3,0 / 0,9	0,60	60,00	2,2	0,0	194,2
✖	59,00	PIV	167	- 0,9 / 4,0	0,60	60,00	3,1	194,2	360,2
✖	60,00	PIV	283	- 4,0 / -1,9	0,60	60,00	5,9	360,2	455,7
✖	61,00	PIV	380	- -1,9 / 5,0	0,60	60,00	6,8	455,7	499,1
✖	62,00	PIV	400	- 5,0 / -1,2	0,60	60,00	6,2	499,1	410,1
✖	63,00	PIV	100	- -1,2 / 2,6	0,60	60,00	3,8	410,1	292,8
✖	64,00	PIV	316	- 2,6 / -5,6	0,60	60,00	8,2	292,8	402,6
✖	65,00	PIV	204	- -5,6 / -0,4	0,60	60,00	5,2	402,6	722,5
✖	66,00	PIV	120	- -0,4 / 1,3	0,60	60,00	1,7	722,5	224,3
✖	67,00	PIV	184	- 1,3 / -6,0	0,60	60,00	7,4	224,3	227,9
✖	68,00	PIV	124	- -6,0 / 0,1	0,60	60,00	6,1	227,9	465,0

Figura 5.6: Resultado da análise em curvas verticais

Erro	Entidade	Tipo	Comprimento	Inclinação	Inclinação máxima	Comprimento mínimo	Taxa de variação de greide	Distancia PIV anterior	
✖	58,00	PIV	116	- 3,0 / 0,9	0,60	60,00	2,2	0,0	
✖	A inclinação do greide é 3,0 % e a máxima permitida é 0,6 %.								
✖	A distância entre o próximo PIV é de 194 metros e a mínima recomendada é de 2000 metros.								

Figura 5.7: Mensagem de erro na entidade 58

5.1 Análise dos resultados

Ao testar o método desenvolvido para realizar o *code-checking* em projetos ferroviários usando o protótipo computacional criado, verificou-se que o protótipo realiza uma checagem computacional das normas de forma rápida, conforme esperado na hipótese deste trabalho.

Verificar os elementos é uma tarefa rápida e a análise e interpretação dos resultados permite que os problemas sejam identificados e corrigidos de antemão. Esses resultados corroboram a

eficácia e validam o método e o sistema a serem usados por engenheiros e avaliadores para avaliar a integridade do projeto.

Os resultados da análise do trecho de ferrovia identificaram algumas curvas que não atendiam aos padrões especificados, como a primeira curva na Figura 5.4 (Entidade 2), cuja análise mostrou que o raio mínimo requerido é maior que o raio adotado. O não-cumprimento desta especificação, devido à adoção de um pequeno raio, faz com que a superelevação necessária para o equilíbrio do trem na velocidade de projeto seja de 19,59 cm, representando um valor acima do máximo recomendado para bitola métrica, que é de 10 cm.

Desta forma, a velocidade máxima para essa curva, com a superelevação no limite máximo de 10 cm e com o raio abaixo do mínimo, seria de 47 km/h. Pode-se notar ao observar os resultados consolidados, no campo de “velocidade máxima com parâmetros recomendados”, que a velocidade máxima, caso o raio mínimo fosse respeitado e com a superelevação máxima de 10 cm, seria de 74 km/h.

Considerando que o valor máximo recomendado para superelevação é de 10 cm, os resultados indicam que, para esta curva particular, a solução mais apropriada seria aumentar seu raio para um valor igual ou superior ao mínimo recomendado pelo padrão, que é 343 m, em contraste com o valor adotado de 122,3 m. Porém, considerando que essa análise foi feita para uma linha ferroviária existente, caso não seja possível alterar sua configuração, recomenda-se que os trechos que não estejam em conformidade com os padrões devam receber atenção especial durante a operação. Em outras palavras, para evitar que ocorram acidentes, a velocidade dos trens nas curvas em desrespeito aos padrões deve ser reduzida, em detrimento do tempo total da rota, mas com maior segurança.

Nos trechos verticais, pode-se notar que a inclinação existente é maior que a inclinação máxima recomendada e que a distância entre PIV's é muito pequena, menor que a distância mínima recomendada.

É importante notar que os dados de entrada foram determinados através de uma simples aproximação de pontos e que o alinhamento real possui valores de raio de cada curva, comprimento de transição e tangente diferentes dos valores adotados, embora sejam valores muito próximos. Os dados para o cálculo das curvas verticais também são aproximados e apresentam valores próximos dos reais.

Os resultados desta pesquisa representam um avanço importante no estado da arte da verificação automatizada de código (verificação de código) em projetos ferroviários, usando um sistema especializado em uma plataforma BIM. Pesquisas semelhantes foram realizadas por Porto (2015), na qual ele propôs métodos e equações para a verificação automática de normas em projetos ferroviários usando planilhas. Em Porto (2016) a análise automática de normas em projeto geométrico ferroviário é aplicada diretamente no AutoCAD Civil 3D através da criação de um plug-in que consegue extrair a geometria do alinhamento automaticamente e exibir os resultados dentro desse software. Já nesse trabalho, a metodologia foi expandida e novas funcionalidades foram implementadas, como a análise do perfil, cálculo da taxa de dormentação, verificação do dimensionamento do trilho e a possibilidade da análise das velocidades máximas nas condições atuais de uma ferrovia com as condições recomendadas. Além disso, os resultados são exibidos aos usuários de forma mais ordenada. Nesse trabalho a parte BIM também foi aprimorada de forma que as informações criadas para cada elemento fiquem armazenadas em suas propriedades.

A pesquisa atual representa um avanço considerável na modelagem e no gerenciamento das informações e dados do problema. O sistema desenvolvido com base nos princípios de engenharia de *software* e conceitos BIM permite uma interface amigável e fácil de usar. A interação e a interatividade do sistema encorajam os usuários a fazerem ensaios de projetos antes de decidir o melhor resultado. Isso também é possível devido à eficiência e agilidade do sistema desenvolvido, que também oferece um projeto com melhor qualidade, com menos erros e ainda aumenta a produtividade do processo.

6 CONCLUSÕES

A aplicação da análise automática de normas já é realizada em outras áreas da engenharia, porém poucas pesquisas com sua aplicação voltada a projetos geométricos de superestrutura ferroviária foram encontradas na literatura e as poucas pesquisas encontradas não apresentam uma metodologia completa para a aplicação dessa análise.

Esse trabalho propõe a elaboração de uma metodologia completa para fazer a análise automática de normas nos projetos de superestrutura ferroviária e o desenvolvimento de um protótipo computacional para implantar a metodologia elaborada. Esse protótipo foi desenvolvido em dois módulos:

- O primeiro módulo irá apoiar o desenvolvimento do projeto pelo engenheiro de projeto para que este possa executar o projeto dentro dos requisitos padrões;
- O segundo módulo atenderá às necessidades dos órgãos reguladores, responsáveis pela avaliação dos projetos submetidos para aprovação. Esses órgãos poderão avaliar rapidamente os projetos submetidos, verificando automaticamente o cumprimento das normas relevantes.

A metodologia deste trabalho para realizar a análise automática de normas de projeto geométrico de superestrutura ferroviária consiste em comparar os dados existentes no projeto com os valores de normas técnicas ou com os resultados de equações que indicam valores ideais para cada tipo de elemento. Quando se inserem os dados relativos à composição ferroviária, da linha férrea e da geometria do alinhamento, o sistema executa os cálculos e determina o valor ótimo de cada variável dos elementos. No final da análise, os resultados são exibidos em forma de relatórios para que o usuário possa verificar se os valores de projeto para todos os elementos estão dentro dos limites definidos pelas normas ou pelos valores calculados. Se uma entidade apresentar algum valor em desrespeito ao das normas, uma mensagem de erro aparece indicando uma não-conformidade no projeto. Com esta visibilidade do erro, o avaliador ou projetista pode comandar a tomada de decisões com confiança, uma vez que as formulações são baseadas em padrões reconhecidos.

O protótipo computacional desenvolvido para a verificação automática de normas foi testado com a execução de análises em um trecho de uma ferrovia de carga de baixa velocidade já existente. A análise em ferrovias já existentes mostram a possibilidade de desenvolver e adaptar

projetos ferroviários para que os trens percorram cada trecho a uma velocidade máxima dentro de padrões de conforto e segurança, reduzindo o seu tempo total de viagem. Esse protótipo permite que a análise de normas ocorra de forma rápida e confiável, mostrando-se adequada ao seu objetivo e capaz de ser implementada para esse propósito e expandida para análise a aprovação de novos projetos ferroviários.

A aplicação da tecnologia BIM e o uso de um modelo exclusivo para extração de informações e dados contribuíram significativamente para o avanço na verificação automática de normas (*code-checking*). Associado à engenharia de *software*, foi possível implementar e correlacionar listas de regras de normas de projeto ferroviário com o desenvolvimento de projetos, o que implicou grandes benefícios para projetistas e agências oficiais de aprovação de projetos. O protótipo elaborado realiza novas onze verificações de parâmetros adicionais que os softwares existentes no mercado não verificam, conforme a Figura 4.16.

Esta pesquisa contribui para o progresso dos objetivos de desenvolvimento do transporte ferroviário no Brasil. O sistema desenvolvido nesta pesquisa oferece contribuições importantes para o processo de desenvolvimento de projetos ferroviários e também para a avaliação do cumprimento de normas quando o projeto é submetido para aprovação nas agências governamentais. Além disso, o sistema agiliza processos, minimiza erros e introduz maior precisão na supervisão de parâmetros de segurança e conforto. Parâmetros mais confiáveis também contribuem para a otimização dos processos de tomada de decisão.

Este trabalho também representa um progresso no desenvolvimento e na aplicação de conceitos BIM na construção de modelos específicos para projetos ferroviários, onde foram propostos novos métodos e ferramentas para verificação automática de normas. Essas contribuições promovem o desenvolvimento da área e oferecem um sistema de qualidade que visa minimizar os erros de projeto e os consequentes impactos em termos de aumento de tempo e custo durante a construção e operação da ferrovia. Esta pesquisa mostra uma nova maneira de automatizar o processo de desenvolvimento, verificação e aprovação de projetos ferroviários com a aplicação e os benefícios das novas tecnologias.

No futuro, padrões específicos de outros países podem ser incluídos no projeto, o que permitirá a análise automática de padrões para diferentes locais. Além disso, novos padrões também podem ser incluídos, como padrões para trens de alta velocidade. A tecnologia proposta neste trabalho também incentivará o desenvolvimento de novas aplicações usando outras

plataformas BIM para diferentes tipos de projetos. Isso permitirá que o engenheiro do projeto verifique o cumprimento de padrões técnicos pré-definidos ao longo do desenvolvimento do projeto. Um importante objetivo futuro será analisar e avaliar o uso desses implementos de automação no desenvolvimento de projetos de engenharia de transporte e o impacto dos resultados em termos de confiabilidade, eficiência e eficácia. Na perspectiva de um cenário de investimentos maiores no transporte ferroviário no Brasil, este sistema ganhará importância como ferramenta facilitadora para engenheiros projetistas e agências reguladoras, respectivamente, no desenvolvimento e avaliação / aprovação de novos projetos.

REFERÊNCIAS

ABANDA, F. H.; BYERS, L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, v. 97, p. 517-527, 2016. ISSN 0360-5442. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135>

AGUILAR, L. J. Fundamentos de Programação – Algoritmos, estruturas de dados e objetos. Tradução da 3ª ed. em espanhol. São Paulo : McGraw-Hill. 2008. 690p.

ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <www.antt.gov.br> Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

ANTT, Programa De Investimentos Em Logística - Disponível em: <<http://pilferrovias.antt.gov.br/>>. Acesso em: 10/06/2017.

AREMA, Manual for Railway Engineering, Volume 1, 2010.

AUTODESK, AutoCAD Civil 3D features. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/autocad-civil-3d/overview>> Acesso em: 15 de janeiro de 2018.

AZHAR, S. et al. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Automation in construction*, v. 20, n. 2, p. 217-224, 2011. DOI: <http://dx.doi.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.autcon.2010.09.019>

BARLISH, K.; SULLIVAN, K. How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in Construction*, v. 24, p. 149-159, 2012. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>

BAX, M. P. Design Science: filosofia da pesquisa em ciência da informação e tecnologia. *Encontro Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação*, v. 15, p. 3883-3903, 2014.

BOUKAMP, F.; AKINCI, B. Automated processing of construction specifications to support inspection and quality control. *Automation in Construction*, v. 17, n. 1, p. 90-106, 2007. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2007.03.002>

BRINA, H. L. Estradas de Ferro. 2ª ed. Volume 1. Rio de Janeiro. LTC. 1988. 258 p.

BRYDE, D.; BROQUETAS, M.; VOLM, J. M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, v. 31, n. 7, p. 971-980, 2013. ISSN 0263-7863. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

CABRAL, A.C.B. Superestrutura ferroviária. Escola Técnica Federal do Espírito Santo, 2005. (Apostila).

CBTU, Instrução Técnica de Serviços de Infraestrutura: Elaboração de Projeto Geométrico, IT-07, 2005.

CHANDRA, S.; AGARWAL, M. M. *Railway Engineering*. New Delhi. Oxford University Press. 2007. 590p.

CHENG, J. C. P.; DAS, M. A BIM-based web service framework for green building energy simulation and code checking. *ITcon*, v. 19: p.150-168, 2014. Disponível em: <<http://www.itcon.org/2014/8>>

CHOI, J.; CHOI, J.; KIM, I. Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings. *Automation in Construction*, v. 46, p. 38-49, 2014. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.005>

DELIS, E. A.; DELIS, A. Automatic Fire-Code Checking Using Expert-System Technology. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 9, n. 2, p. 141-156, 1995. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1995\)9:2\(141\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1995)9:2(141))

DE LIMA, J. J. A.; SCHÜTZER, K. Integração entre sistemas cae/cad utilizando os softwares mdesign e solid edge. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2009

DNIT, Projeto de Superestrutura da Via Permanente – Lastro e Sublastro, ISF 212, 2015a

DNIT, Projeto de Superestrutura da Via Permanente – Trilhos e Dormentes, ISF 213. 2015b

DNIT, Procedimento para Inspeção de Material – Trilho, PIM-001, 2015c

DRESCH, A. Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para engenharia de Produção. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

DYM, C. L. et al. A knowledge-based system for automated architectural code checking. *Computer-Aided Design*, v. 20, n. 3, p. 137-145, 1988. ISSN 0010-4485. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(88\)90021-8](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(88)90021-8)

EADIE, R. et al. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Automation in Construction*, v. 36, p. 145-151, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.001>

EASTMAN, C. et al. Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, v. 18, n. 8, p. 1011-1033, 2009. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002>

ESVELD, C. Modern Railway Track. Zaltbommel, The Netherlands. MRT-Productions. 2001.

FONTELLES, M. J.; SIMÕES, M. G.; FARIAS, S. H.; FONTELLES, R. G. S. Metodologia da pesquisa científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. *Revista Paraense de Medicina*, v. 23, p. 1-8, 2009.

GARRETT, J. H.; FENVES, S. J. A knowledge-based standards processor for structural component design. *Engineering with Computers*, v. 2, n. 4, p. 219-238, 1987. ISSN 1435-5663. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01276414> >.

GERHARDT, E. T.; SILVEIRA, D. T. Métodos de pesquisa. 1ª ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009, 120p.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1994.

GU, N.; LONDON, K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, v. 19, n. 8, p. 988-999, 2010. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.002>

GU, N. et al. Building information modeling: an issue of adoption and change management. In ICAN conference 2007: Mission Control: Power, knowledge and collaboration in project practice. Australian Institute of Project Management (AIMP), 2007, Australia. Disponível em: <http://digitalcollections.qut.edu.au/1757/1/28263.pdf>

HEVNER, A.R.; MARCH, S.T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. MIS Quarterly, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

JIANG, L.; LEICHT, R. Automated Rule-Based Constructability Checking: Case Study of Formwork. Journal of Management in Engineering, v. 31, n. 1, p. A4014004, 2014. ISSN 0742-597X. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000304](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000304)

LEE, J.-K; et al. Development of space database for automated building design review systems. Automation in Construction, v. 24, p. 203-212, 2012. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.03.002>

LEWIS, M. J. T. Railways in the Greek and Roman world. In: Early Railways. A selection of papers from the first International Early Railways Conference. 2001. p. 8-19.

Li, Y. (2015). Automated Code-checking of BIM models. Universidad de Cantabria, Espanha. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10902/7238>>

LUO, H.; GONG, P. A BIM-based Code Compliance Checking Process of Deep Foundation Construction Plans. Journal of Intelligent & Robotic Systems, v. 79, n. 3, p. 549-576, 2015. ISSN 1573-0409. DOI: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-014-0120-z> >.

MACÊDO, F. B. Estudo do Desgaste de Trilhos Ferroviários. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

MACHADO, A. et al, Manual Técnico da Via Permanente. Vale S/A, 2009.

MALSANE, S. et al. Development of an object model for automated compliance checking. Automation in Construction, v. 49, Part A, p. 51-58, 2015. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.004>

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, v. 15, p. 251-266, 1995.

MARCH, S. T.; STOREY, V. C. Design Science in the Information Systems Discipline: An Introduction to the Special Issue on Design Science Research. *MIS Quarterly*, v. 32, n. 4, p. 725-730, 2008.

MARTINS, J., & ALMEIDA, V. (2010). Automated code-checking as a driver of BIM adoption. *International Journal of Housing Science*, v. 34, n. 4, p. 286-294, 2010. Disponível em: < <http://www.housingscience.org/html/publications/pdf/34-4-6.pdf>>

MARTINS, J. P.; MONTEIRO, A. LicA: A BIM based automated code-checking application for water distribution systems. *Automation in Construction*, v. 29, p. 12-23, 2013. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.08.008>

MARTINS, J. P.; MONTEIRO, A. Licenciamento automático de projectos, um incentivo à adopção de metodologias BIM. In ICEUBI 2011, 2011. DOI: <http://hdl.handle.net/10216/69840>

MIETTINEN, R.; PAAVOLA, S. Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. *Automation in Construction*, v. 43, p. 84-91, 2014. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.009>

MONTEIRO, A. Avaliação da aplicabilidade do modelo IFC ao licenciamento automático de projectos de redes de distribuição predial de água. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2010. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~gequaltec/w/images/Tese_AGCM.pdf>

MOTAWA, I.; ALMARSHAD, A.; A knowledge-based BIM system for building maintenance, *Automation in Construction*, v.29, January 2013, pp 173-182, ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.008>.

NABAIS, R. J. S. Manual Básico de Engenharia Ferroviária. 1ª ed. São Paulo. Oficina de Textos. 2014. 360 p.

PAZ, I. B. F.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise dos métodos de cálculo de superelevação ferroviária em transporte de cargas. Anais do XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, Ouro Preto, v. 1, p. 344-354. 2015

PORTO, M. F. et al. Automatic Analysis of Standards in Rail Projects. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, v. 13, n. 4, p. 39-44, 2015. ISSN: 1690-4524. Disponível em: <[http://www.iiisci.org/journal/CV\\$/sci/pdfs/MA969EM15.pdf](http://www.iiisci.org/journal/CV$/sci/pdfs/MA969EM15.pdf)>.

PORTO, M.F.; BARACHO, R.M.A.; FRANCO, J.R.Q., RIBEIRO R.L.P.; NUNES N.T.R. "Geometric Design of Railway Superstructures: Automatic Analysis of Standards in a Building Information Modeling Environment", in J. Pombo, (Editor), "Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance", Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 29, 2016. doi:10.4203/ccp.110.29

PORTO, M. F.; NUNES, N. T. R. ; RIBEIRO, E. L. ; MIRANDA, L. C. J. . Metodologia de Cadastro Ferroviário por Filmagem em 360°. In: AEAMESP - 20a Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2014, São Paulo. 20a Semana de Tecnologia Metroferroviária 2014. São Paulo: AEAMESP, 2014. v. 1. p. 1-5.

PORTO, T.G. PTR 2501 – Ferrovias. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. (Apostila).

PORWAL, A.; HEWAGE, K. N. Building Information Modeling (BIM) partnering framework for public construction projects. Automation in Construction, v. 31, p. 204-214, 2013. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.004>

ROSA, R.A. Estradas de ferro – Material rodante. Universidade Federal do Espírito Santo. (Apostila).

SALAMA, D.; EL-GOHARY, N. Automated Compliance Checking of Construction Operation Plans Using a Deontology for the Construction Domain. Journal of Computing in Civil Engineering, v. 27, n. 6, p. 681-698, 2013/10/04 2013. ISSN 0887-3801. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000298](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000298)

SANTOS, J.V. Gestão de Projetos de Infraestrutura Ferroviária: A Dinâmica das Ações Preliminares. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação T.DM-010^a/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2012, 99p.

SCHEER, S. et al. Impactos do Uso do Sistema CAD Geométrico e do Uso do Sistema CAD-BIM no Processo de Projeto em Escritórios de Arquitetura. In: VII Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios. Curitiba: UFPR. 2007.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SIMON, H. A. The Sciences of the Artificial. 3. ed. USA: MIT Press, 1996.

SOLIHIN, W.; EASTMAN, C. Classification of rules for automated BIM rule checking development. Automation in Construction, v. 53, p. 69-82, 2015. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003>

SOLINHO, J. L. G. A Indústria Mecânica e a Revolução do Processo de Projeto. CADware Technology, São Paulo, ano 2, n.8, p31-33, 1998.

TAN, X.; HAMMAD, A.; FAZIO, P. Automated Code Compliance Checking for Building Envelope Design. Journal of Computing in Civil Engineering, v. 24, n. 2, p. 203-211, 2015/10/04 2010. ISSN 0887-3801. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2010\)24:2\(203\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2010)24:2(203))

TZANAKAKIS, K. The Railway Track and Its Long Term Behaviour: A Handbook for a Railway Track of High Quality. 1^a ed. Volume 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013. 414 p.

VALEC, Especificação de Projeto 80-EG-000A-17-0000: Projeto geométrico, 2011a.

VALEC, Especificação de Projeto 80-EG-000A-18-0000: Projeto de superestrutura, 2011b.

VALEC, Especificação de Projeto 80-EG-000A-18-0001: Superelevação em curvas ferroviárias, 2011c.

WALLIMAN, N. S. R. Research Methods: The Basics. New York. Routledge. 2011. 189p.

WARD, D. et al. Corrib onshore gas pipeline, Ireland – using BIM on a large infrastructure project. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, v. 167, n. 3, p. 123-130, 2014. ISSN 0965-089X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/cien.13.00047>

WAZLAWICK, R. S. *Metodologia de Pesquisa para Ciência da Computação*. 1ª ed. Rio de Janeiro. Elsevier. 2009.

WIERINGA, R.; HEERKENS, J. The methodological soundness of requirements engineering papers: a conceptual framework and two case studies. v. 11, n. 4, p. 295-307, 2006.

WIERINGA, R. Design science as nested problem solving. *Proceedings of the 4th international conference on design science research in information systems and technology*, ACM, p. 8, 2009.

ZHANG, J.; EL-GOHARY, N. Automated Information Transformation for Automated Regulatory Compliance Checking in Construction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 29, n. 4, p. B4015001, 2015/10/04 2015. ISSN 0887-3801. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000427](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000427)

ZHANG, S.; TEIZER, J.; LEE, J-K.; EASTMAN, C.; VENUGOPAL, M. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, v. 29, p. 183-195, 2013. ISSN 0926-5805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>