

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPARAÇÃO DOS CÁLCULOS DE
DIMENSIONAMENTO DE DORMENTES DE CONCRETO
MONOBLOCO PROTENDIDO**

ALDO FELICÍSSIMO DE SOUZA JUNIOR

ORIENTADOR: PhD. JOSÉ MATSUO SHIMOISHI

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO - 2018
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

COMPARAÇÃO DOS CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DE DORMENTES DE CONCRETO MONOBLOCO PROTENDIDO.

ALDO FELICÍSSIMO DE SOUZA JUNIOR

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**Profº JOSÉ MATSUO SHIMOISHI, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**Profª MICHELLE ANDRADE, DSc (UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)**

**Profº Pastor Willy Gonzales, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 16 DE FEVEREIRO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

JUNIOR, ALDO FELICÍSSIMO DE SOUZA

Comparação dos cálculos de dimensionamento de dormentes de concreto monobloco protendido [Distrito Federal] 2018. xii, 64 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Dormentes

2. Dormentes de concreto

3. Cálculo

4. Dimensionamento

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JUNIOR, A.F.S. (2018). Comparação dos cálculos de dimensionamento de dormentes de concreto monobloco protendido. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Aldo Felicíssimo de Souza Junior.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Comparação dos cálculos de dimensionamento de dormentes de concreto monobloco protendido.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Aldo Felicíssimo de Souza Junior

SMAS Trecho 1, Bloco H, Apartamento 116- Condomínio Living Park Sul

71218-010 - Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre foi muito bom comigo colocando grandes pessoas ao meu lado, que sempre me incentivaram e me fizeram crescer. Por me proteger em todos momentos difíceis que passei e por sempre olhar pelo meu caminho.

Agradeço à minha família, por me ajudar em todos os momentos da minha vida, por me proporcionarem condições de estudo, pois sempre batalharam para que nunca me faltasse nada.

Quero agradecer em especial ao meu Cunhado Luiz Tolosa, pelo apoio e ajuda na realização do trabalho e também, à minha namorada Débora Café que me incentivou e ajudou, sendo um exemplo para mim.

Agradeço aos meus amigos, que me fizeram correr atrás dos meus objetivos seja por palavras de incentivo ou por críticas construtivas.

À Concreta Consultoria e Serviços, empresa junior na qual fiz parte por quase 3 anos. Empresa que fez parte do meu amadurecimento pessoal e profissional e que me proporcionou a oportunidade de conhecer pessoas incríveis.

Agradeço também ao meu mentor, Rafael Martins, que me ajudou imensamente no último ano, com inúmeros conselhos que me fizeram crescer profissionalmente.

Aos membros da banca, pela disposição de participar da mesma.

À Universidade de Brasília, por me ter feito o profissional que sou e além disso, disponibilizado diversos meios para que eu pudesse ter uma educação diferenciada.

RESUMO

O uso de ferrovias é fator potencializador do desenvolvimento de um país. Tendo em vista que as estradas de ferro podem conectar regiões, escoar grande quantidade de produtos por longas distâncias e emitir menos CO₂ que outros modais, o investimento nessa área se faz necessário. No início do setor ferroviário brasileiro, foram utilizadas bitolas e dormentes com dimensões escolhidas pelos proprietários das linhas férreas, sem definição e padronização por parte do governo, ocasionando a falta de integração entre as ferrovias. Tendo em vista essa falta de padronização, o Plano Nacional de Viação definiu como padrão utilizado no país a bitola larga. Visto isso, nesse trabalho foram desenvolvidos trens-tipo levando em consideração o atual padrão das ferrovias brasileiras e com isso adaptou-se um modelo para o estudo da norma americana e da norma brasileira. Com esses trens-tipo foi estudado o Momento Fletor de Projeto das duas normas e a protensão empregada. Após a obtenção dos dados referentes à análise dos Momentos Fletores, foi possível estudar as particularidades de cada norma. O presente trabalho de conclusão de curso teve como principal foco a comparação entre diferentes métodos de dimensionamento de dormentes monobloco de concreto protendido, elementos fundamentais para a implantação da linha férrea. Ademais, foi apresentado o comparativo entre os esforços para o dimensionamento dos dormentes utilizando-se a norma brasileira e uma norma internacional (AREMA) para que ao final fosse possível recomendar a utilização da melhor norma de dimensionamento em cada carregamento e dimensão de dormente, baseando-se nos Momentos Fletores e esforço de protensão, tendo em vista as características do transporte ferroviário usado no Brasil.

Palavras-chave: Comparação de dormentes. Dimensionamento. Dormentes de concreto.

ABSTRACT

The use of railways is a potentiating factor in the development of a country. Since railways can connect regions, run off large amounts of products over long distances, and produce less CO₂ than other modes, investment in this area is mandatory. At the beginning of the Brazilian railway sector, the dimensions of the gauges and sleepers were chosen by the owners of the railway lines, without definition and standardization by the government, causing the lack of integration between the railroads. In the view of this non standardization, the National Road Plan defined the wide gauge as the country's standard. Taking this in consideration, in this paper, trains-type were developed taking into account the current Brazilian railroads pattern and, with that, a model was adapted in order to the study the American and the Brazilian standard. With these type trains, the the two standards' Project Fleet Moment and pretension employed were studied. After obtaining the data regarding the Fleeting Moments' analysis, it was possible to study the particularities of each one. The main objective of this present work was to compare different methods of designing monobloc concrete slabs, which are fundamental elements for the implementation of the railway line. In addition, a comparison was made between the efforts to design the sleepers using the Brazilian standard and an international standard (AREMA) so that, by the end, it would be possible to recommend the use of the best standard of design in each load and dimension of sleeping, based on the Fleet Moments and the effort of design in view of the characteristics of rail transportation used in Brazil.

Keywords: Comparison of sleepers. Concrete sleepers. Dimension.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Divisão das bitolas pela malha ferroviária.....	5
Figura 2.2- Cronologia do tamanho da malha ferroviária brasileira	7
Figura 2.3- Investimento público e privado	7
Figura 2.4- Matriz de transporte com países de mesmo porte territorial.....	8
Figura 2.5- Quantidade de acidentes ferroviários.....	9
Figura 2.6- Superestrutura de ferrovia.....	10
Figura 2.7- Planta e Perfil de ferrovia	11
Figura 2.8- Esforços no lastro	12
Figura 2.9- Dormente Monobloco.....	14
Figura 2.10- Dormente Bibloco.....	15
Figura 2.11- Dormente Polibloco	15
Figura 2.12- Evolução dos trilhos	16
Figura 2.13- Trilho Vignole	16
Figura 2.14- Dormente B70.....	19
Figura 2.15- Dormente bibloco	19
Figura 2.16- Dormente NTF504.....	20
Figura 2.17- Dormente B70W- 60/54	21
Figura 2.18- Dormente CC329- F2	22
Figura 3.1- Esquema de etapas para o projeto final	24
Figura 4.1- Velocidade Máxima em função do raio mínimo	28
Figura 4.2- Trilho TR-68.....	29
Figura 4.3- Carregamento atuante nos dormentes.....	32
Figura 4.4- Carregamento segundo a CEN	33
Figura 4.5- Momento Fletor pelo método CEN	33
Figura 4.6- Espaço entre dormentes e B.....	37
Figura 4.7- Fator V e T pela MGT	38
Figura 4.8- Carregamento no apoio do trilho	47
Figura 4.9- Carregamento para o Centro do Trilho.....	48
Figura 4.10- Esforços no dormente Método B	49
Figura 4.11- Dimensão do Dormente	55
Figura 4.12- Dormente com Protensão.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Ferrovias e suas bitolas	9
Tabela 2.2- Vantagens e Desvantagens dos dormentes de concreto	15
Tabela 2.3- Melhor utilização de dormentes	15
Tabela 4.1- Taxa de dormentação	30
Tabela 4.2- Características Trens tipo	31
Tabela 4.3- Momentos Fletores Reais- 280cm.....	34
Tabela 4.4- Momentos Fletores Reais- 275cm.....	35
Tabela 4.5- Momentos Fletores Reais- 270cm.....	35
Tabela 4.6- Valores de B	37
Tabela 4.7- Valores de T para MGT	39
Tabela 4.8- Coeficientes de ponderação.....	40
Tabela 4.9- Momentos Fletores 280 cm	40
Tabela 4.10- Momentos Fletores 275 cm	41
Tabela 4.11- Momentos Fletores 270 cm	41
Tabela 4.12- Recomendação- 280 cm	42
Tabela 4.13- Recomendação- 275 cm	43
Tabela 4.14- Recomendação- 270 cm	44
Tabela 4.15- Fator de Distribuição e Carga por eixo	46
Tabela 4.16- Dormente de 280 cm Método A.....	51
Tabela 4.17- Dormente de 280 cm Método B	51
Tabela 4.18- Dormente de 275 cm Método A.....	52
Tabela 4.19- Dormente de 275 cm Método B	52
Tabela 4.20- Dormente de 270cm Método A.....	53
Tabela 4.21- Dormente de 270 cm Método B	53
Tabela 4.22- Momento Fletor Negativo	56
Tabela 4.23- Dados do Dormente.....	56
Tabela 4.24- Resultado Protensão	58
Tabela 5.1- Recomendações.....	61

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	39
Equação 2	45
Equação 3	47
Equação 4	48
Equação 5	49
Equação 6	56
Equação 7	56
Equação 8	57

LISTA DE SIGLAS

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

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

CEN- European Committee for Standardization

CNT- Confederação Nacional do Transporte

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

ERRI- European Rail Research Institute

PND- Plano Nacional de Desestatização

RFFSA- Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima

SNCF - Société Nationale de Chemins de Fer Français

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo geral.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1. Histórico da malha ferroviária brasileira	4
2.2. Números da estrutura ferroviária brasileira	6
2.3. Elementos de Ferrovias	10
2.3.1. Superestrutura.....	10
2.3.2. Sublastro.....	11
2.3.3. Lastro.....	12
2.3.4. Dormentes	13
2.3.4.1. Dormentes de Concreto	13
2.3.5. Trilho.....	16
2.4. Detalhamento de Dormentes de Concreto Monobloco Protendido.....	17
2.4.1. História dos Dormentes de Concreto	17
2.4.2. Atuais modelos produzidos	20
2.4.2.1. Inglaterra.....	20
2.4.2.2. Alemanha.....	21
2.4.2.3. Estados Unidos da América.....	21
2.4.3. Forças Atuantes nos Dormentes de Concreto	22
2.4.3.1. Distribuição da Carga Vertical no Dormente	22
3. METODOLOGIA	24
3.1. Etapa 1	25
3.2. Etapa 2	25
3.3. Etapa 3	26
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	27
4.1. Definição do trem tipo e elementos de projeto.....	27
4.1.1. Escolha das bitolas e trilhos	28
4.1.2. Taxa de dormentação	29
4.1.3. Carregamento por eixo	30
4.1.4. Trem tipo completo	30
4.2. Esforços nos dormentes	31

4.2.1.	Esforços Verticais	32
4.3.	Momentos Fletores Reais	33
4.4.	Momentos Fletores de projeto AREMA.....	36
4.4.1.	Carregamento distribuído	36
4.4.2.	Fatores de tonelagem e velocidade.....	38
4.4.3.	Momentos Fletores calculados	39
4.4.4.	Resultados	40
4.5.	Momentos Fletores de projeto NBR 11709.....	44
4.5.1.	Carga de Projeto (Fd)	45
4.5.2.	Momento de Projeto Método A (Md)	46
4.5.3.	Momento Fletor Negativo no centro do dormente Método A.....	48
4.5.4.	Momento de Projeto Método B (Md).....	49
4.5.5.	Momento Fletor Negativo no centro do dormente Método B	50
4.5.6.	Resultados Comparativos	50
4.6.	Dimensionamento da Protensão	54
4.6.1.	Protensão	56
5.	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

Atualmente o Brasil possui 29.291 km de malha ferroviária, contando com trens urbanos de passageiro. Porém esse número é menor do que o encontrado em 1960, quando a extensão era de 38.287 km. Dessa forma, a atual densidade de linhas férreas brasileiras é de 3,3 km por mil m² de território (IPEA, 2016).

Uma das particularidades do sistema ferroviário brasileiro é que suas linhas possuem três tipos de bitolas diferentes. Existem bitolas largas, de 1,60 metros; bitola métrica, 1 metro; bitola mista. Visto isso, o sistema nacional não possui um padrão quanto às suas linhas férreas.

Esse fato, das linhas possuírem bitolas diferentes, deve-se ao investimento de capital privado, incentivado pelo governo brasileiro. Como o investimento vinha de companhias particulares, não houve um padrão a se seguir, estando ao critério dos investidores que tipo de ferrovia construir. Por isso, um dos grandes problemas das ferrovias é a falta de padrão de bitola, o que traz restrição de circulação para algumas locomotivas e vagões.

Porém, mesmo com essas adversidades o setor ferroviário é responsável por 20,7% do transporte de cargas do país e 0,5% do transporte de passageiros, importante observar que o transporte de passageiros é focado em zona urbana (DEPEC, 2017). Esse valor tem potencial de crescimento elevado, pois quanto mais distante o percurso mais competitivo o transporte ferroviário fica, dessa forma, visto o tamanho continental do país, pode-se pensar em alavancar esses números.

Por último, o Brasil pretendia investir no ano de 2017 aproximadamente 895 milhões de reais, valor significativamente baixo para esse modal. Dessa forma o grande desafio imposto ao setor ferroviário é atrair investimentos privados a fim de aumentar o investimento no setor e além disso, aumentando sua malha de ferrovias de forma padronizada, evitando problemas passados (ANTF, 2017).

1.2. Justificativa

O fato do Brasil ser um país com dimensões continentais, atrelado ao poderio econômico e aos principais produtos exportados pelo país, potencializa o modal ferroviário para ser, futuramente, o meio mais utilizado de transporte de produção interna. Outro fator potencializador de ferrovias é o baixo nível de poluição e impacto ambiental comparado com alguns outros modais.

Além desses fatores, é importante dizer que o custo de implantação de uma ferrovia é alto e sua implantação é voltada para grandes distâncias. Atrelado a isso, tem-se que alguns elementos físicos de ferrovias são numerosos, como é o caso dos dormentes. A quantidade desse elemento é fator econômico expressivo na implantação e manutenção dos caminhos de ferro.

Desse modo, surge a necessidade de começar a se pensar em padronização dos elementos ferroviários, em um país que seja realmente integrado e conectado pelas linhas férreas, de modo que não aconteça os problemas anteriores de limite de bitola ou outros problemas que causem interrupção da continuidade da ferrovia. E um desses elementos para a padronização são os dormentes, responsáveis por receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, mantendo invariável a bitola (BRINA, 1979).

Assim, diante dessa necessidade, será elaborada uma análise das normas de dimensionamento de dormentes monoblocos protendidos, levando em consideração o sistema ferroviário brasileiro. Com essa análise será compreendido qual modelo dimensionamento é mais recomendado para se utilizar, dentro das variáveis apresentadas, para o sistema ferroviário brasileiro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é a comparação dos métodos de dimensionamento estrutural dos dormentes de concreto monobloco protendido. Comparar os esforços atuantes em cada modelo da norma AREMA e da NBR 11709, a fim de proporcionar melhor entendimento da norma brasileira e americana, levantando pontos importantes sobre elas. Para essa análise, serão considerados os Momentos Fletores encontrados para cada norma e o esforço de protensão utilizado.

1.3.2. Objetivos específicos

Após o entendimento do objetivo geral do trabalho, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Apresentação dos trens tipo para as ferrovias brasileiras;
- Apresentação dos esforços atuantes nos dormentes de concreto protendido;
- Apresentação das características do dimensionamento pela AREMA e NBR 11709;
- Recomendação de utilização das normas dimensionamento de acordo com o carregamento.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A pesquisa consiste no formato comparativo entre os dados avaliados para se chegar ao resultado onde se possa encontrar a melhor norma para se dimensionar um dormente de concreto monobloco protendido, baseando-se na realidade ferroviária brasileira. Inicialmente foram identificadas as fontes mais relevantes para o estudo de ferrovias e por consequência o estudo de dormentes de concreto monobloco protendido. Essa identificação foi realizada através de ferramentas de pesquisa computacionais, buscas por livros e artigos científicos.

Neste capítulo são apresentados os conceitos relacionados à história da malha ferroviária brasileira, assim como um detalhamento numérico do setor no país. Em seguida, são abordados elementos constituintes de ferrovias e tipologias de dormentes. Por último serão tratadas duas normas de dimensionamento para dormentes de concreto monobloco protendido.

2.1. Histórico da malha ferroviária brasileira

As primeiras tentativas de implantação de ferrovias no Brasil aconteceram entre os anos de 1835 a 1852. Porém, elas somente surgiram no Brasil durante o ciclo do café, que predominou da segunda metade do século 19 até meados de 1930. Na época, a economia do país era primordialmente agrícola e agroexportadora (CNT, 2013).

Em 1852, Ireneu Evangelista de Souza, mais tarde Barão de Mauá, que, quase quase exclusivamente por sua conta, pois subscreveu quase toda a totalidade do capital necessário, construiu a ligação entre o Porto de Mauá (no interior na Baía de Guanabara) e a raiz da Serra (Petrópolis). Em 30 de abril de 1854, foi inaugurada a primeira Estrada de Ferro no Brasil, com 14,5 km de extensão (BRINA, 1979).

Também em 1852, o governo imperial brasileiro instituiu a Lei de Garantia de Juros, que autorizava a concessão da construção e exploração de ferrovias pelo prazo máximo de 90 anos, além disso, a lei instituiu uma taxa de retorno de 5% do capital empregado na construção férrea, pagos com dinheiro do tesouro nacional. Outro fato importante estabelecido por essa lei, era a isenção de impostos sobre material importado para construção da ferrovia e a proibição de outra construção ferroviária em uma raio de cerca de 33 km, do atual caminho de ferro (CNT, 2013).

Visto que essas medidas foram impactantes para o setor, houve crescente interesse da iniciativa privada na construção e exploração de ferrovias. Apesar dessa crescente exploração do sistema ferroviário, o país não pensou em criar um órgão regulador. Dessa forma, o crescimento desordenado e sem planejamento da malha, resultou na utilização de diferentes tipos de bitolas nos diversos trechos, o que é problema até hoje para o país, pois certas ferrovias não possuem conexão com outras por usarem bitolas diferentes. Tal fato pode ser percebido na Figura 2.1.

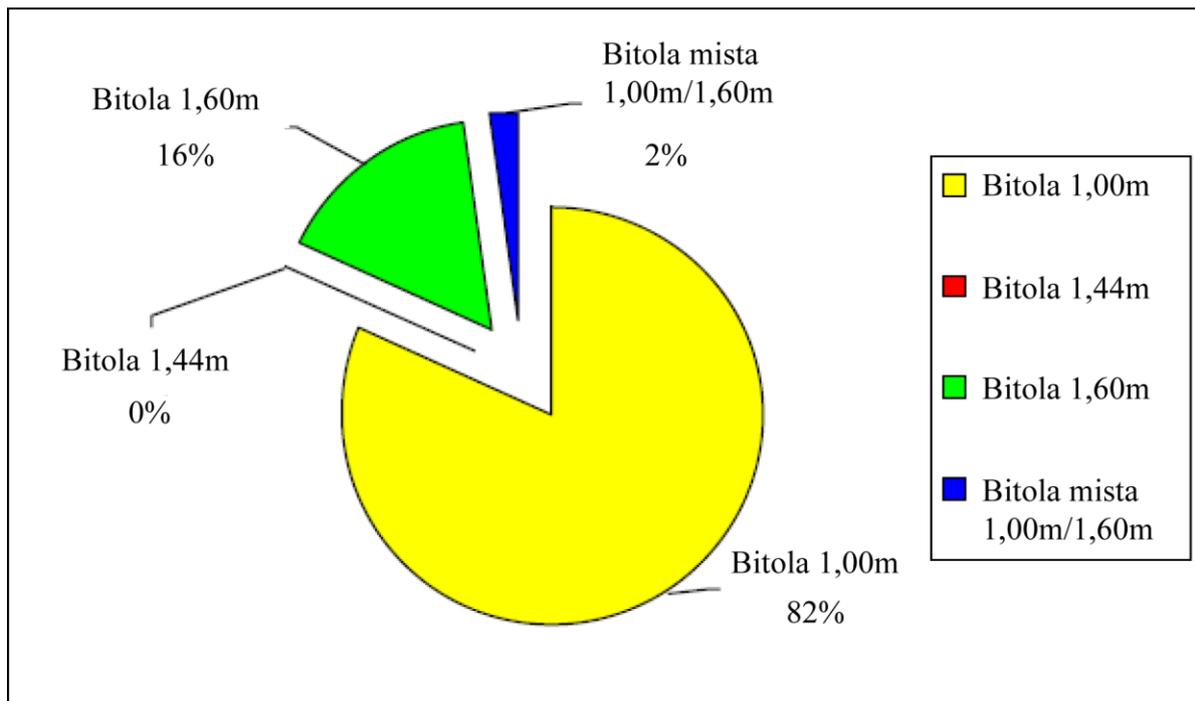


Figura 2.1- Divisão das bitolas pela malha ferroviária
Fonte: Via Permanente, 2008.

Em 1855 foi organizada a Estrada de Ferro D. Pedro II, que deu origem à Estrada de Ferro Central do Brasil (BRINA, 1979). Outro fato importante foi a ligação ferroviária entre São Paulo e Rio de Janeiro, as duas mais importantes cidades do país, ocorrida em 1877. Essa ligação, uniu as ferrovias Estrada de Ferro São Paulo e Estrada de Ferro Dom Pedro II. Até 1889, o Brasil já possuía 9,5 mil km de ferrovias, o governo era dono de aproximadamente um terço dessa malha.

No primeiro quarto do século XX, a construção de rodovias pavimentadas foi expandida, dessa forma o modal ferroviário e rodoviário começaram a competir pelo transporte de carga e passageiros. Com isso, as ferrovias começaram a perder investimento em infraestrutura e seus problemas internos de gestão começaram a comprometer esse sistema. Além disso, algumas

estradas de ferro foram construídas especificamente para transportar determinada mercadoria, café por exemplo, cuja a produção desapareceu. Ademais, outras foram construídas com objetivo pioneiro de desbravamento e penetração, que devido ao seu anacrônico traçado e da obsolescência de seu equipamento, não puderam suportar a concorrência de outros meios de transporte (BRINA, 1979).

Porém, apesar dessas dificuldades as ferrovias continuaram a expandir, como mostra a tabela 2.1.1. Contribuíram para esse crescimento as novas tecnologias que chegavam ao setor ferroviário. Os trens movidos a vapor foram substituídos por elétricos e logo depois por trens a diesel, aumentando a eficiência do setor ferroviário (CNT, 2013).

Com o passar do tempo e a fim de melhorar a gestão das ferrovias, em 1957 foi criada a RFFSA (Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima.), sob a administração da União. Com a criação, o setor ferroviário ganhou com o aumento da tonelagem transportada e aumento da produtividade. Mas apesar disso, as ferrovias ainda trabalhavam com déficit orçamentário de até 90% (CNT, 2013).

Nas décadas seguintes, sem melhora na questão deficitária, atrelado a crise fiscal do Estado brasileiro, o modelo de gestão de ferrovias se tornou insustentável. As receitas que a RFFSA tinha não era suficiente para sustentar suas operações. Dessa forma, na década de 1980 começaram os estudos para o retorno do capital privado no setor ferroviário e na década de 1990 a RFFSA foi concedida (CNT, 2013).

Em 1992, surgiu o Plano Nacional de Desestatização (PND), que foi uma política de governo para entrada de capital privado e melhoria do sistema, visto que o governo não conseguia melhorar ou manter a qualidade das ferrovias. Dessa forma, linhas férreas foram concedidas à iniciativa privada com base em alguns critérios. Até hoje existem ferrovias concedidas a empresas privadas, visto que o tempo de concessão poderia chegar até 60 anos.

2.2. Números da estrutura ferroviária brasileira

Como mencionado anteriormente, o Brasil possui aproximadamente 30.129 km de extensão de ferrovias. Desse total, 28.692 km estão concedidas à iniciativa privada e divididas em 12 trechos distintos. O restante da malha ferroviária está concentrada em trens urbanos e turísticos,

equivalente a aproximadamente 6% do total de ferrovias no país (CNT, 2013). A Figura 2.2 retrata de forma mais detalhada o tamanho da malha ferroviária com o passar dos anos.

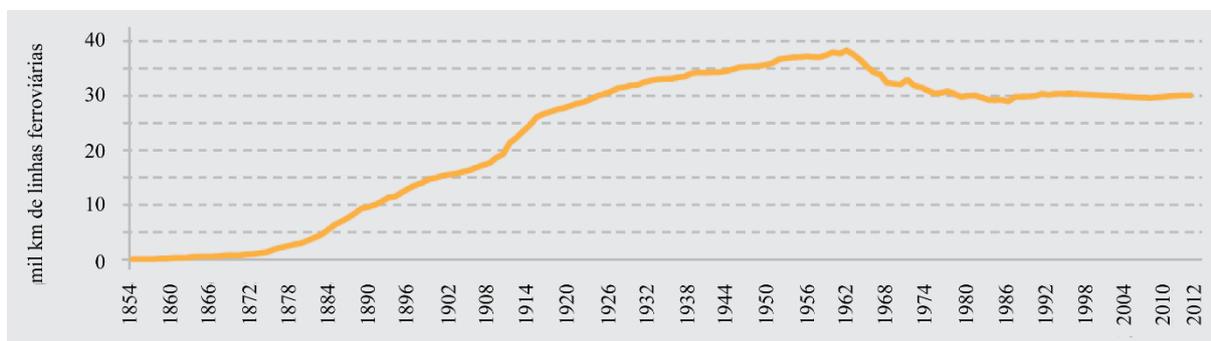


Figura 2.2- Cronologia do tamanho da malha ferroviária brasileira
Fonte: CNT, 2013.

O reflexo do aumento da malha ferroviária e eficiência do setor é expresso em números. Desde o início das concessões as ferrovias de cargas ampliaram significativamente o volume transportado, atingindo o recorde em 2015, com o transporte de 492 milhões de toneladas úteis. Esse valor representa um aumento de 94,4% desde 1997 (ANTF, 2015).

Além disso, é importante observar que a iniciativa privada vem investindo no setor de ferrovias, onde no ano de 2015 foi aplicado R\$ 6,824 bilhões de reais no setor. Esse valor é 15,85% maior do que o investido no ano anterior. Tal investimento possibilitou um aumento na frota de material rodante. Atualmente, as ferrovias contam com 3.182 locomotivas e 103.098 vagões, aumento de 176% e 135% respectivamente, desde o início das concessões (ANTF, 2015). A comparação entre os investimentos públicos e privados pode ser observado na Figura 2.3.

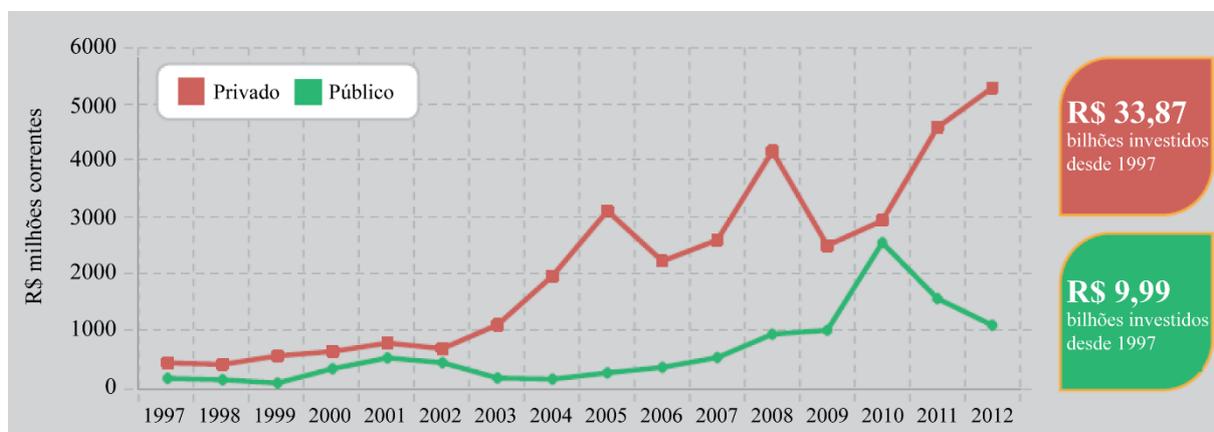


Figura 2.3- Investimento público e privado
Fonte: ANTF, 2011.

Nesse compasso, se faz necessário observar que a participação das ferrovias na matriz de transporte do Brasil. Atualmente, as ferrovias ocupa 25% do “share” de transportes brasileiros. Tal número tem grandes possibilidades de mudança, visto que a comparação com países de mesmo porte territorial, mostra que o maior país da América Latina ainda pode crescer sua participação na matriz ferroviária (ANTF, 2015). A Figura 2.4 apresenta a matriz de transporte nos seguintes países.

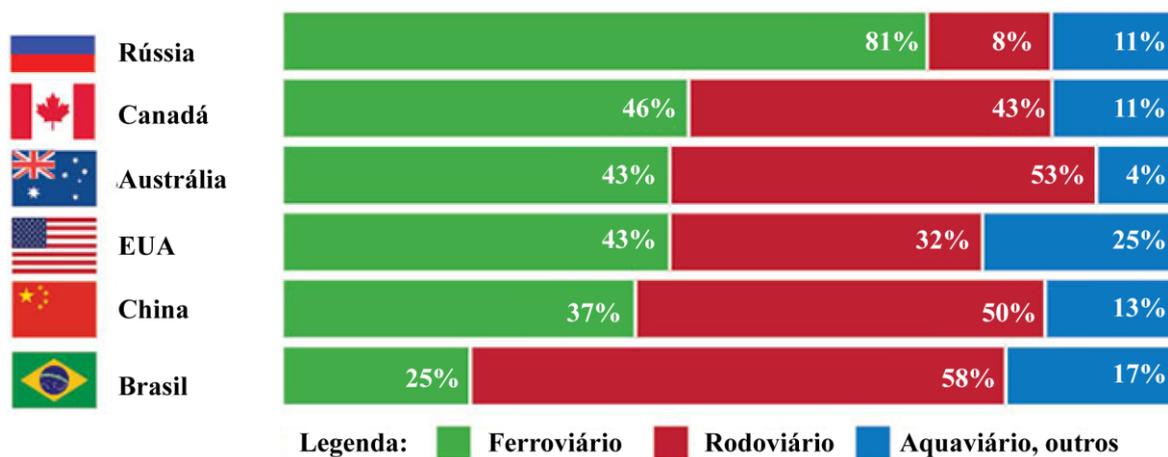


Figura 2.4- Matriz de transporte com países de mesmo porte territorial
Fonte: PNL, 2014

Outro dado importante para se analisar das ferrovias brasileiras é a distribuição das bitolas pela quantidade de linhas, esse dado é interessante por mostrar que as linhas férreas são pouco conectadas, devido ao emprego de bitolas diferentes, alguns trechos ainda pode haver conexão por usar bitolas mistas, porém são poucos trechos comparados a quantidade de ferrovias no Brasil. A Tabela 2.1 apresenta com mais detalhes esse dado.

Um fator relevante, que aumenta a confiabilidade e a preferência pelo modal ferroviário é a segurança do transporte. Desde 1997 até 2011 o número de acidentes caiu 81%, fato esse que vai na direção oposta do modal rodoviário, por exemplo, que o número de acidentes vem aumentando (ANTF, 2015).

Tabela 2.1- Ferrovias e suas bitolas

Extensão da Malha Ferroviária - 2015					
Extensões em km					Total
	Origem	Bitola			
		1,60	1,00	Mista	
ALLMN - América Latina Logística Malha Norte	-	735	-	-	735
ALLMO – América Latina Logística Malha Oeste	RFFSA	-	1953	-	1953
ALLMP - América Latina Logística Malha Paulista	RFFSA	1533	305	269	2107
ALLMS – América Latina Logística Malha Sul	RFFSA	-	7223	-	7223
EFC – Estrada de Ferro Carajás	-	997	-	-	997
EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas	-	-	888	-	888
FCA – Ferrovia Centro-Atlântica	RFFSA	-	7085	130	7215
FNS S/A -Ferrovia Norte-Sul TRAMO NORTE (VALEC-Subconcessão)	-	745	-	-	745
FERROESTE – Estrada de Ferro Paraná Oeste	-	-	248	-	248
FTC – Ferrovia Tereza Cristina	RFFSA	-	163	-	163
MRS – MRS Logística	RFFSA	1708	-	91	1799
FTL S/A - Ferrovia Transnordestina Logística	RFFSA	-	4257	20	4277
VALEC/Subconcessão: Ferrovia Norte-Sul TRAMO CENTRAL	-	815	-	-	815
Subtotal	-	6533	22122	510	29165
Demais Operadoras					
	-	57	149	-	206
Supervia/CPTM/Trensurb/METRO-SP RJ – Passageiros	-	832	22	-	854
Trombetas/Jari/Amapa - Carga	-	70	230	-	300
Corcovado/Campos do Jordão	-	-	51	-	51
Subtotal	-	959	452	-	1411
TOTAL	-	7492	23027	510	30576

Fonte: ANTT, 2015.

A Figura 2.5 representa a quantidade de acidentes ferroviários nos últimos anos.

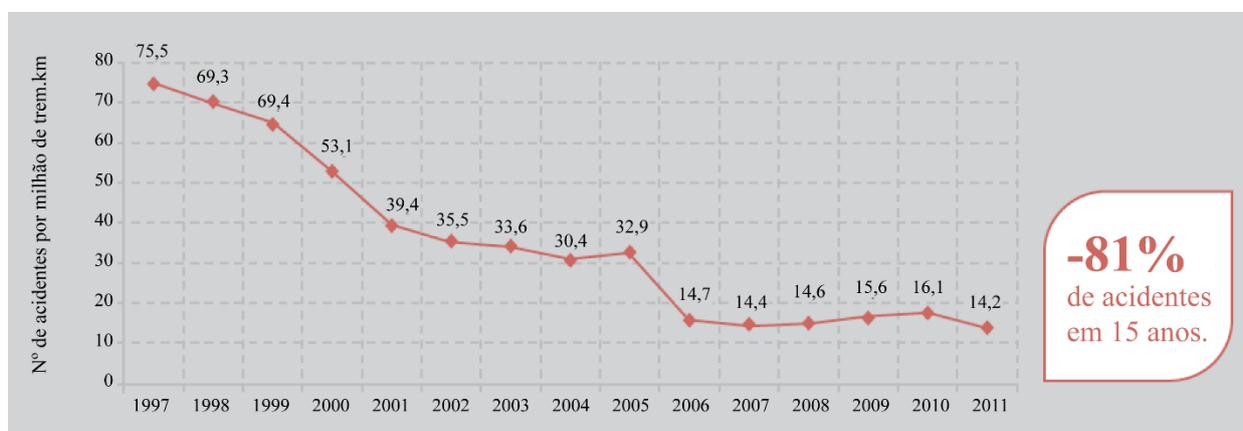


Figura 2.5- Quantidade de acidentes ferroviários
Fonte: ANTF, 2011.

Por último, se faz necessário falar que o transporte ferroviário é ecologicamente mais correto. Tendo em vista que um vagão graneleiro de 100 toneladas substitui a movimentação de aproximadamente quatro caminhões, isso reduz a poluição e os congestionamentos nas estradas e centros urbanos. Ademais, o número de empregos diretos gerados por esse modal foi de 39.741 em 2015, aumento de 140% desde o início das concessões (ANTF, 2015).

2.3. Elementos de Ferrovias

Com o intuito de compreender de forma mais consciente o funcionamento dos dormentes de concreto é necessário, primeiramente, compreender quais são os elementos de superestrutura de uma ferrovia e suas finalidades.

Dessa forma, esse capítulo não terá a finalidade de apresentar conteúdo sobre a infraestrutura. Visto isso, serão apresentados alguns conceitos importantes de linhas férreas, que são fundamentais para a compreensão final desse trabalho de conclusão de curso.

2.3.1. Superestrutura

A superestrutura das ferrovias é composta pela Via Permanente e Plataforma Ferroviária as quais estão sujeitas a desgastes de uso, decorrente da ação das rodas dos veículos e de intempéries (ações do meio ambiente). Segundo (BRINA, 1979) a superestrutura é construída de uma forma a ser renovada, quando seu desgaste atingir os limites de segurança ou quando a substituição de seus constituintes se faz necessário para melhoria de intensidade de tráfego. A Figura 2.6 ilustra a Superestrutura Ferroviária.

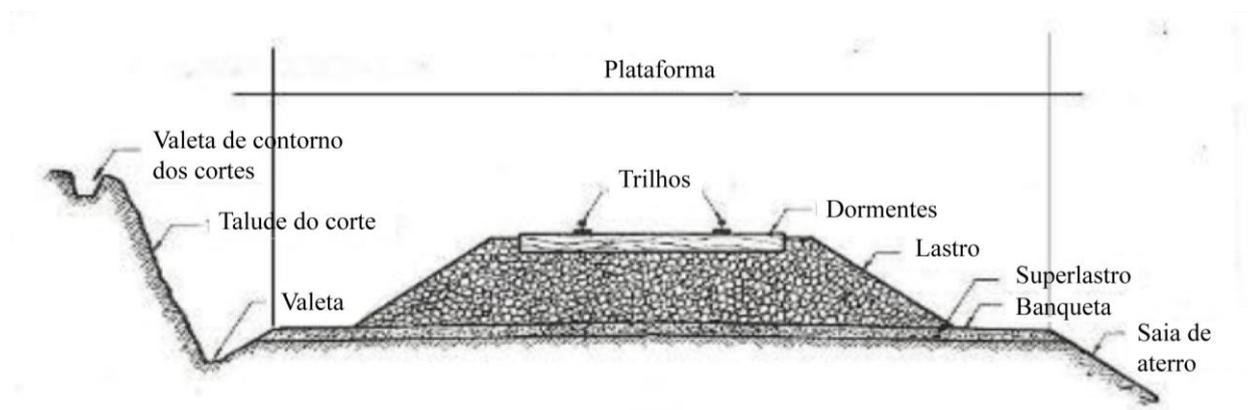


Figura 2.6- Superestrutura de ferrovia
Fonte: BRINA, 1979.

Os três principais elementos da Superestrutura e que compõe a Via Permanente são: o Lastro, os Dormentes e os Trilhos. Esses três elementos, apoiam-se sobre a Plataforma Ferroviária, como pode ser visto na Figura 2.7.

Segundo (BRINA, 1979) o sublastro, possui uma característica especial pois embora esteja ligado a última camada da infraestrutura, possui característica que justifica seu enquadramento em superestrutura. Dessa forma, iremos abordar o sublastro durante essa análise.

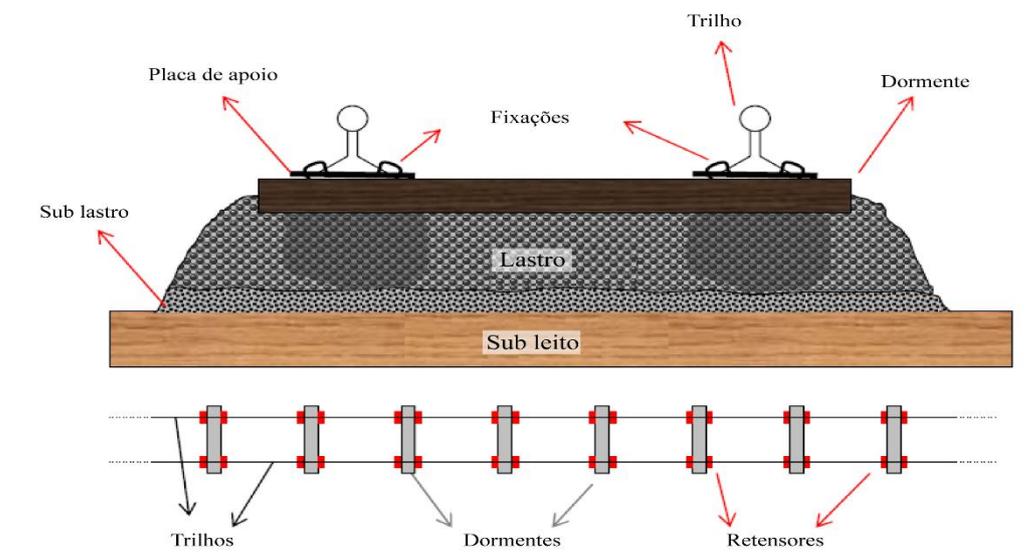


Figura 2.7- Planta e Perfil de ferrovia
Fonte: PORTO, 2004.

2.3.2. Sublastro

O sublastro, como mencionado anteriormente, é intimamente ligado a infraestrutura, porém é compreendido como superestrutura (BRINA, 1979). Esse elemento possui as seguintes finalidades: aumentar a capacidade de suporte da plataforma, evitar a penetração do lastro na plataforma, aumentar a resistência do leito à erosão e penetração de água e permitir relativa elasticidade ao apoio do lastro (BRINA, 1979).

Devido ao alto custo do lastro, pelo fato do uso de material nobre, de grande consumo e as vezes de difícil obtenção, é justificada a racionalização do lastro (NETO, 2012). Dessa forma, o aumento da capacidade de suporte da plataforma é feito pelo aumento do sublastro e diminuição da altura do lastro.

Outro função importante do sublastro é o impedimento da penetração da lama. Essa estrutura funciona como um filtro, no qual impede a passagem da lama vindo do sub-leito em direção ao lastro. Dessa forma, não ocorre erosão ou penetração na camada superior ao subleito. Garantindo integridade a um elemento de elevado custo (PORTO, 2004).

Para o dimensionamento do subleito, existe na literatura especificações referente a índices granulométricos dos materiais para seu uso. Além disso, apresenta soluções caso a ferrovia a ser construída não possua tais materiais. Outro ponto importante, refere-se a espessura do sublastro, que deve ter uma taxa de trabalho compatível com a capacidade de suporte. Segundo Brina (1979), uma espessura de 20 cm é suficiente para a maioria das situações.

2.3.3. Lastro

O lastro, elemento da superestrutura situado entre os dormentes e o sublastro, e segundo Brina (1979), tem as seguintes finalidades: distribuir os esforços recebidos dos dormentes, formar um suporte elástico, formar uma superfície regular e uniforme para os dormentes, impedir o deslocamento dos dormentes e facilitar a drenagem da superestrutura.

Segundo Porto (2004), para o lastro conseguir desempenhar sua finalidade é imprescindível que possua as seguintes propriedades: granulometria uniforme, assegurando boa drenagem; possuir partículas com formas cúbicas, o que evita o recalque com a passagem do trem; suficiente resistência aos esforços transmitidos pelos dormentes; ser resistente a agente atmosféricos e não produzir pó, algo que geraria incômodo aos passageiros. Os esforços estão representados na Figura 2.8.

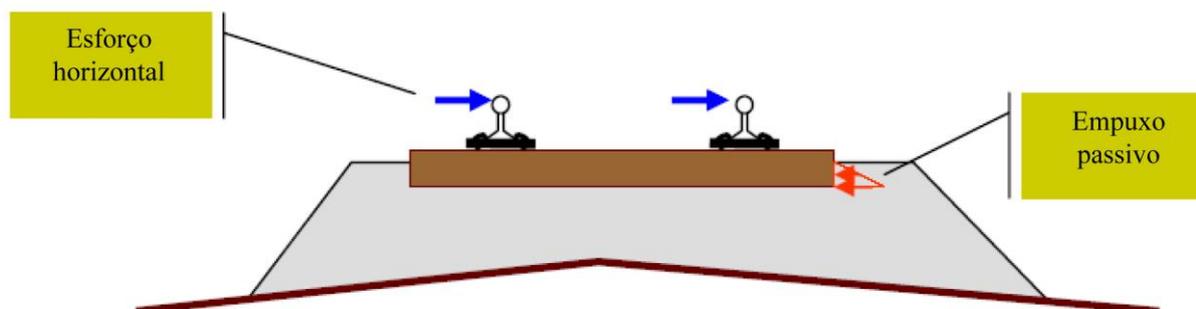


Figura 2.8- Esforços no lastro
Fonte: PORTO, 2004.

É importante notar que o material para construção do lastro é definido na literatura, sua composição pode ser dos seguintes materiais: terra, areia, cascalho, escórias e pedra britada. Sendo a construção usando terra a menos aconselhada e a construção por pedra britada sendo preferencial, porém seu custo é mais elevado (BRINA, 1979).

Por último, para além da escolha do material usado no lastro é preciso saber seu dimensionamento. De fato a literatura apresenta que o fator principal é a pressão transmitida pelos dormentes. Com uma sequência de fórmulas é possível chegar ao dimensionamento adequado do lastro, como esse trabalho não tem foco no cálculo do lastro não será apresentado essas fórmulas.

2.3.4. Dormentes

Dormentes são elementos transversais à linhas férreas, onde sobre eles são colocados os trilhos. Com um sistema de fixação, constituem o elemento de união entre trilho e lastro, formando, por fim, a estrutura de via. De fato, estão submetidos aos esforços de flexão impostos pelo carregamento vindo dos trilhos, além disso, são responsáveis pela invariabilidade da distância entre os trilhos.

Segundo Brina (1979), para o perfeito cumprimento de suas funções, os dormentes necessitam das seguintes características: suas dimensões devem fornecer apoio suficiente para que a taxa de trabalho do lastro não ultrapasse certo limite, que sua espessura tenha rigidez mas ao mesmo tempo possua alguma elasticidade, resistência e durabilidade aos esforços, oposição eficaz dos deslocamentos longitudinais e transversais, além de boa fixação para o trilho.

Seguindo essas características, os dormentes podem ser feitos de diversos materiais, entre eles: madeira, ferro, concreto, aço e até mesmo de plástico. Cada material tem sua particularidade e pode ser dimensionado seguindo algumas orientações. Para melhor compreensão sobre os dormentes, será desenvolvido uma explicação um pouco mais detalhada sobre os três tipos mais usados.

2.3.4.1. Dormentes de Concreto

Devido a escassez de boas madeiras para dormentes, para evitar o desfloreamento e atrelado aos inconvenientes dos dormentes de aço, começou-se a pensar em utilizar estruturas de concreto (BRINA, 1979). Dessa forma, a procura por substituir a madeira e o aço fez surgir os dormentes de concreto.

Como o intuito desse projeto é tratar do dormente de concreto monobloco, será apresentados os tipos de dormentes e suas características, como nos capítulos anteriores e no capítulo específico para dormentes de concreto monobloco será mais profunda a análise.

Os primeiros dormentes de concreto eram armados e imitavam as dimensões dos dormentes de madeira. Os seus primeiros resultados não agradaram, pois o bloco apresentava trincas e fissuras, devido aos esforços recebidos. Ademais, a partir disso surgiam grandes rupturas o que inviabiliza o uso. Com o passar do tempo foi aprimorando o nível de dormentes de concreto, dessa forma surgiram outros modelos.

Os principais modelos lançados são: monobloco de concreto protendido, o objeto de estudo deste trabalho; bibloco ou misto, formado pela união de concreto e aço; e o polibloco. Há de se atentar que um dos fatores de êxito desse tipo de dormente é sua fixação com o trilho, onde a fixação não pode ser rígida. Além disso, o trilho bibloco apresenta fixação própria e patenteada (BRINA, 1979). As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11 apresentam as vistas de um dormente monobloco.

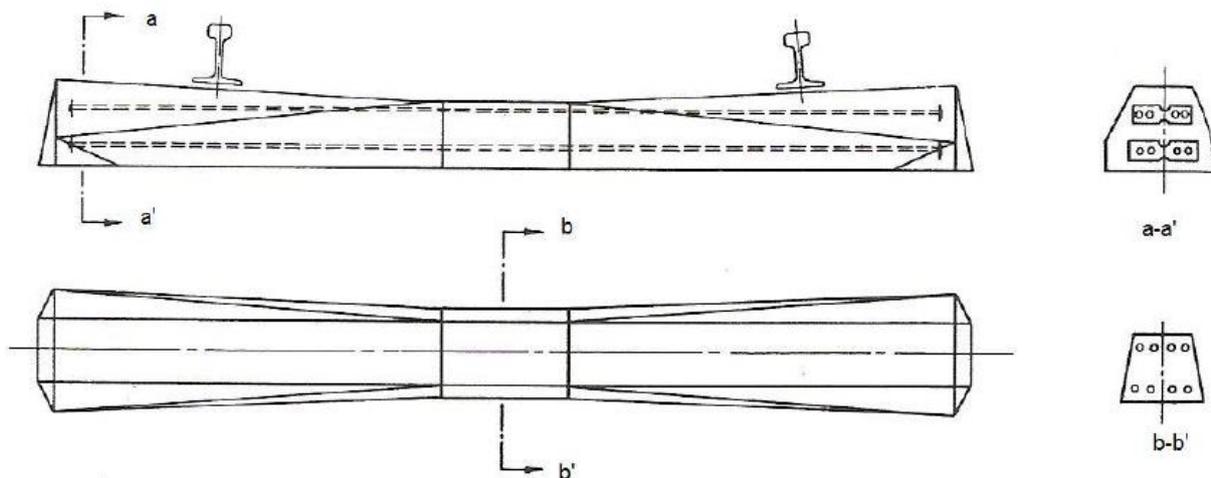


Figura 2.9- Dormente Monobloco
Fonte: BRINA, 1979.

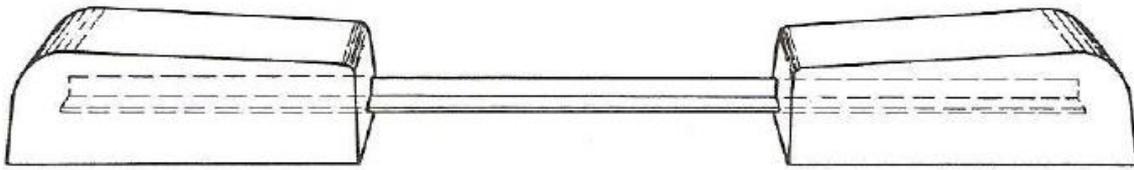


Figura 2.10- Dormente Bibloco
Fonte: BRINA, 1979.

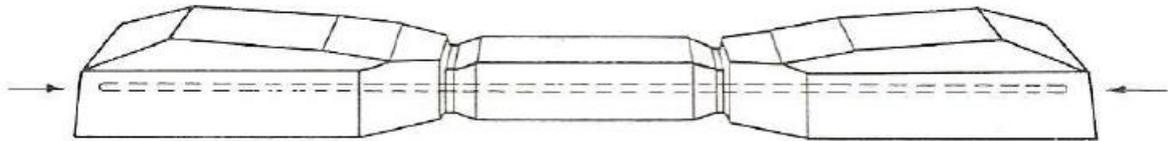


Figura 2.11- Dormente Polibloco
Fonte: BRINA, 1979.

Para finalizar, é interessante analisar a Tabela 2.1 que apresenta as vantagens e desvantagens dos dormentes de concreto e a Tabela 2.2 que apresenta quando cada dormente tem a utilização indicada.

Tabela 2.2- Vantagens e Desvantagens dos dormentes de concreto

Vantagens	Desvantagens
Maior massa (maior resistência a esforços laterais) 300-400 kg	Manuseio e substituição onerosos
Manutenção da bitola	Destruição em descarrilamento
Isolante	Vulnerável a solicitações excepcionais
Invulnerável a fungos	
Vida útil longa	

Fonte: PORTO, 2004.

Tabela 2.3- Melhor utilização de dormentes

Critérios	Melhor tipo de dormente para aplicação
Vida útil	Concreto
Manuseio	Madeira/ Aço
Estabilidade	Concreto
Isolamento	Madeira/ Concreto

Fonte: PORTO, 2004.

2.3.5. Trilho

Trilho é o elemento da superestrutura que constitui a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários servindo-lhes, ao mesmo tempo, de apoio e guia. Os trilhos sofreram grande evolução ao longo da história do transporte ferroviário, tendo em vista o desenvolvimento da tecnologia do aço, e além do mais o desenvolvimento do setor ferroviário, aumentando cada vez mais a quantidade de produto transportado (NETO, 2012). A evolução dos trilhos é apresentada na Figura 2.12.

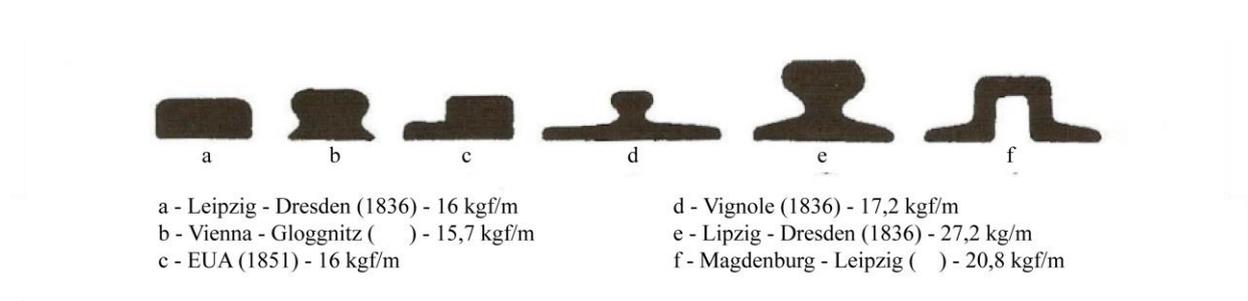


Figura 2.12- Evolução dos trilhos
Fonte: NETO, 1991.

A forma e o comprimento das peças evoluíram, gradativamente, até alcançarem as modernas seções e pesos por metro, suportando as grandes cargas por eixos, dos trens modernos. Depois disso, os trilhos foram evoluindo para o chamado “Trilho de Duas Cabeças”, onde a espessura da mesa superior era consideravelmente maior que a alma. Até que em 1836, foi desenvolvido o trilho “Vignole”, que é apresentado na Figura 2.13, composto basicamente: boleto, alma e patim (NETO, 2012).

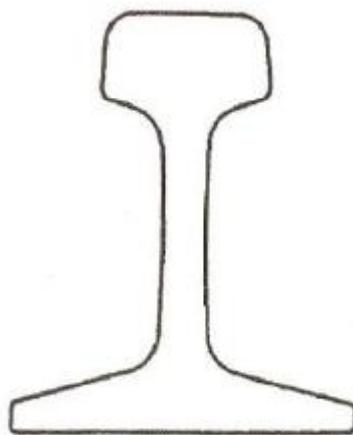


Figura 2.13- Trilho Vignole
Fonte: BRINA, 1979.

Os trilhos são elementos fundamentais para o bom funcionamento de uma ferrovia, devido a isso, esse componente deve apresentar as seguintes características: dureza, tenacidade, elasticidade e resistência a flexão. Para a confecção de trilhos os principais materiais utilizados são: ferro, carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre. Cada material adicionando uma característica ao trilho, como por exemplo, aumento da resistência (NETO, 2012).

Devido ao tamanho da importância dos trilhos, esse elemento passa por rigorosos testes de recebimento. Tais testes são: dimensões e pesos; prova de choque; ensaio de tração; ensaio de dureza de Brinell; ensaio de resiliência; ensaio micrográfico e macrográfico; composição química; e ensaio de entalhe e fratura. Além desses ensaios, os trilhos são classificados de acordo com o desempenho nos ensaios feitos (NETO, 2012).

2.4. Detalhamento de Dormentes de Concreto Monobloco Protendido

Este capítulo tem como objetivo apresentar de forma mais detalhada os dormentes de concreto. Para isso, é apresentado um breve histórico sobre o tema, a fim de entender a evolução dos modelos de dormentes com o passar do tempo. Logo após é apresentado os esforços resultante do funcionamento das linhas férreas. Visto isso, torna-se possível compreender de maneira mais completa a importância e como os dormentes de concreto monobloco protendido atuam para o bom funcionamento das ferrovias.

2.4.1. História dos Dormentes de Concreto

No princípio das ferrovias, usava-se dormentes de madeira preferencialmente, como suporte do trilho e mantenedor da bitola. Os dormentes de madeira apresentam, como excelente característica, a flexibilidade que resulta em grande capacidade de suportar vibrações. Porém, com o passar dos anos, a escassez e o elevado preço fez a madeira perder competitividade no ramo de dormentes e abrir portas para a entrada dos dormentes de concreto protendido. Visto isso, países europeus começaram a substituir dormentes de madeira pelo de concreto, com destaque a Inglaterra, Alemanha e França (BASTOS, 1999).

O primeiro projeto de dormente de concreto surgiu em 1884, pelo francês Mounier. Logo depois, a Áustria e Itália se tornaram os pioneiros na produção desse tipo de dormente. Aos poucos os países começaram a implantar dormentes de concreto, tendo destaque a França, que

usou dormentes monoblocos e biblocos de concreto armado. De modo geral, esses elementos de concreto armado não produziram bons resultados, com exceção do dormente monobloco projetado pela Eternit na Itália, que usava fibrocimento (BASTOS, 1999).

Para melhor compreensão, até 1940 os dormentes feitos de concreto eram apenas armados e não trouxeram êxito nas suas aplicações. Porém, a partir de 1940 surgiram os dormentes de concreto protendido pré e pós tensionado. Esses sim, tiveram êxito em sua aplicação e são usados até hoje (BASTOS, 1999).

O início da história dos dormentes de concreto protendido se deu em 1943, na Inglaterra, onde foi desenvolvido o primeiro modelo: o DOW-MAC. Cinco anos depois, surgiu um modelo monobloco melhorado, o STENT, de excelente comportamento. Esses tipos de dormentes usavam o método de protensão em linhas longas, o que foi adotado, posteriormente, em muitos países. Atualmente, a Inglaterra conta com mais de 30 milhões de dormentes de concreto (BASTOS, 1999).

Outro fato histórico importante aconteceu na Alemanha, onde em 1940, iniciou-se os experimentos com o dormente de concreto armado denominado B1. Logo após, começou-se a fabricar outro modelo, o B3, que possuía menor armadura e tinha resultados satisfatórios. O primeiro modelo protendido alemão foi o B2, que era construído com 56 fios de aço com diâmetro de 2,5 mm e torcidos aos pares, por consequência do B2 surgiram o B6 e B9. Dessa forma, em 1949 a Alemanha decidiu usar apenas dormentes monoblocos de concreto protendido. Visto isso, hoje o país possui mais de 49 milhões de dormentes monoblocos de concreto protendido e os mais usuais são os modelos B58 e B70, apresentado na Figura 2.14 (BASTOS, 1999).

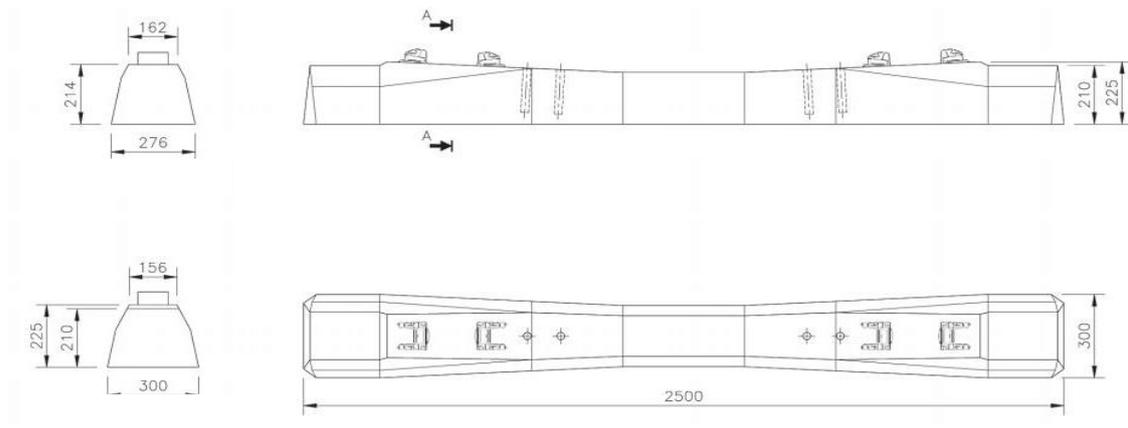


Figura 2.14- Dormente B70
 Fonte: AVENG INFRASET, 2017.

A França também é um país fundamental no desenvolvimento de dormentes de concreto protendido. Em 1949, foi desenvolvido o dormente bibloco SNCF/RS, com faixa elástica RN criada em 1947. Nos anos que se passaram, a SNCF (Société Nationale de Chemins de Fer Français), considerou o dormente bibloco como real alternativa na substituição dos dormentes de madeira. Por fim, foi confirmada a preferência pelos dormentes biblocos, devido ao seu baixo custo e maior resistência lateral de lastro, tais dormentes são empregados inclusive em linhas de alta velocidade (BASTOS, 1999). A Figura 2.15 representa um dormente bibloco.

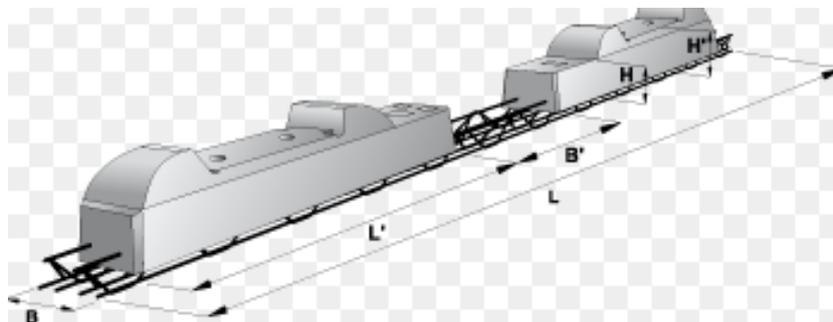


Figura 2.15- Dormente bibloco
 Fonte: ZPSV, 2017.

Por último, é necessário falar da importância dos Estados Unidos da América na história do desenvolvimento dos dormentes de concreto protendido. No começo da implantação desses tipo de elementos, os EUA sofreram com muitos problemas, pois não conseguiam obter um tipo de dormente que tivesse resultado satisfatório, visto a falta de projetos corretos, problemas na fixação com o trilho e fissuras nos dormentes. Dessa forma, a AREMA (*American Railroad Engeneering and Manutenance -of-Way Association*) formou uma comissão para debater o assunto e chegar a uma posição favorável (WEBER, 1975). A partir de 1973, os dormentes

americanos, chamados de “novos dormentes”, apresentaram desempenhos satisfatórios, apresentando boa fixação e diminuindo as fissuras que causavam a ruptura do dormente (VENUTI, 1980).

2.4.2. Atuais modelos produzidos

Neste item serão apresentados os principais modelos de dormentes utilizados na Inglaterra, Alemanha e Estados Unidos da América. Países que estão entre os vinte países com maior extensão ferroviária do mundo, sendo os Estados Unidos da América dono da maior malha de ferrovias do mundo. Além disso, esses países participaram, no século XX, do desenvolvimento dos dormentes de concreto (BASTOS, 1999).

2.4.2.1. Inglaterra

A Inglaterra possui diversos modelos de dormentes de concreto que merecem destaque, por ter sido o primeiro país a apresentar modelos de dormentes de concreto protendido. Pode-se falar do modelo DOW-MAC, um dos primeiros dormentes de concreto protendido apresentado pela Inglaterra. Outro modelo interessante, por possuir menor altura comparado com outros dormentes, é o EF28 (O)S, destinado para ferrovias que pedem dormentes de altura reduzida. Possui 265 kg e comprimento de 2,58 metros. Por último, pode-se falar sobre o dormente NTF504, que se destaca por ser empregado no metrô de Londres. Possui 260 kg e 2,58 metros de comprimento (BASTOS, 1999). Esse dormente é representado pela Figura 2.16.



Figura 2.16- Dormente NTF504
Fonte: TARMAC, 1996.

2.4.2.2. Alemanha

Os dormentes alemães possuem destaque no cenário internacional, pois foram desenvolvidos a partir de estudos experimentais durante o século XX. Primeiramente, pode-se falar sobre o dormente B58W-54 que apresenta uma geometria que o faz ser mais seguro para vias, apresentando maior resistência aos impactos e deslocamentos laterais. Sua massa de 235 kg aliada ao seu comprimento de 2,4 metros, proporcionam vias com alta estabilidade. Além disso, pode-se falar do dormente B70W- 60/54, que possui massa de 303 kg e comprimento de 2,6 metros. Devido as essas dimensões, esse dormente possui grande superfície de apoio, o que traz mais estabilidade para as ferrovias de velocidade superior a 200 km/h (BASTOS, 1999). A Figura 2.17 representa o dormente B70W.

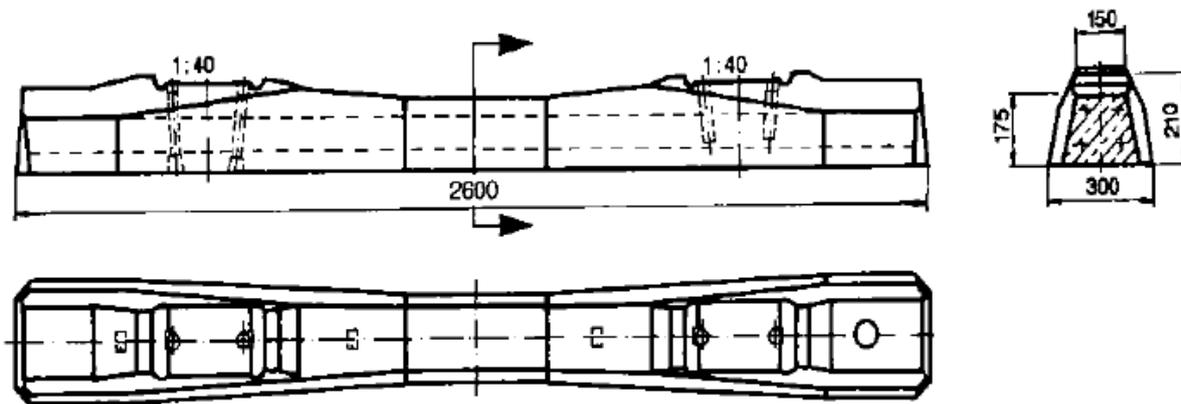


Figura 2.17- Dormente B70W- 60/54
Fonte: BETONWERK RETHVISCH, 1996.

2.4.2.3. Estados Unidos da América

Os Estados Unidos, sempre muito presente no ramo ferroviário, apresenta muito dormentes de concreto de sucesso, porém será apresentado apenas dois modelos. O primeiro modelo, CT3, foi testado e aprovado em curvas de deflexão de 11 graus e gradiente longitudinal de 2,2% de inclinação. Possui 340 Kg e comprimento de 2,59 metros. O segundo modelo, CC329- F2, foi projetado para atender uma via de transporte leve. Possui 272 kg e 2,51 metros de comprimento (BASTOS, 1999). A Figura 2.18 representa o dormente CC329- F2.

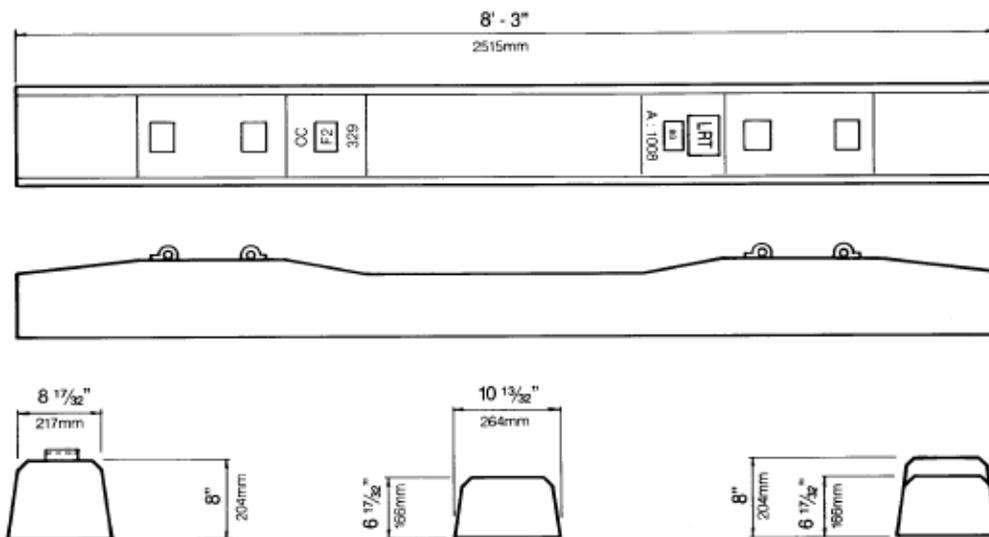


Figura 2.18- Dormente CC329- F2
 Fonte: BASTOS, 1999.

2.4.3. Forças Atuantes nos Dormentes de Concreto

O projeto teórico de um dormente é complexo, devido a isso, seu dimensionamento é muitas vezes feito com base na experiência prática adquirida. Desta forma, o projeto é mais empírico do que teórico. A razão para isto é que, como as ferrovias trabalham com ação dinâmica e de alta frequência, é muito difícil medir com precisão um carregamento. Visto isso, para dimensionamento de dormentes não se faz tão necessário tamanha precisão para fabricar o elemento (BASTOS, 1999).

Dando sequência a este capítulo, serão apresentadas as principais cargas atuantes nos dormentes de concreto protendido. Lembrando que as vias são submetidas a três tipos de cargas: cargas verticais, cargas laterais e cargas longitudinais.

2.4.3.1. Distribuição da Carga Vertical no Dormente

Para encontrar a carga vertical atuante no dormente se faz necessário saber o espaçamento entre os dormentes e o espaçamento dos eixos dos veículos. Também é necessário saber a reação do lastro e sublastro; e por último a rigidez dos trilhos (BASTOS, 1999).

Como o espaçamento entre os dormentes e o espaço entre os eixos dos veículos é algo muito particular do projeto a ser executado, esse dado é muito variado. Em suma, o carregamento do vagão e locomotiva é algo que deve entrar no cálculo do dimensionamento dos dormentes. Esse carregamento entrará como uma carga vinda dos trilhos (BASTOS, 1999).

Outra importante carga vertical que deve ser analisada é a pressão exercida pelo lastro. Essa pressão é encontrada com o cálculo da pressão média na base do dormente. Outro fato a observar é que esse valor varia de acordo com a qualidade do lastro empregado na ferrovia a ser dimensionada os dormentes (BASTOS, 1999).

Faz-se necessário falar, sobre os Momentos Fletores atuantes. Esses momentos são produzidos pelas rodas dos trens, devido a isso, os dormentes de concreto devem ser dimensionados para resistir, sem fissurar ou trincar, aos esforços máximos produzidos. (BASTOS, 1999).

Por fim, outro carregamento que atuará no dormente de concreto será o esforço cortante, oriundo dos carregamentos verticais. Tal esforço é deve ser analisado e controlado, porém sua atuação mais danosa é para grandes estruturas, o que não é o caso dos dormentes de concreto protendido.

3. METODOLOGIA

Os métodos para obtenção do resultado final deste estudo já existem: as formas de dimensionamento dos dormentes segundo cada norma. Visto isso, os métodos já são consagrados, sendo necessário compará-los e analisa-los em suas particularidades adaptadas ao cenário brasileiro. O critério para seleção dos elementos que serão comparados baseou-se no quão utilizados são e na sua importância no cenário ferroviário mundial.

Sendo assim, obtém-se o formato no qual este trabalho será conduzido, a fim de verificar as vantagens e deficiências das duas normas de dimensionamento de dormentes de concreto monobloco protendido usando um modelo adaptado às ferrovias brasileiras. O fluxo da Figura 3.1 representa as etapas da pesquisa, as quais serão detalhadas adiante.

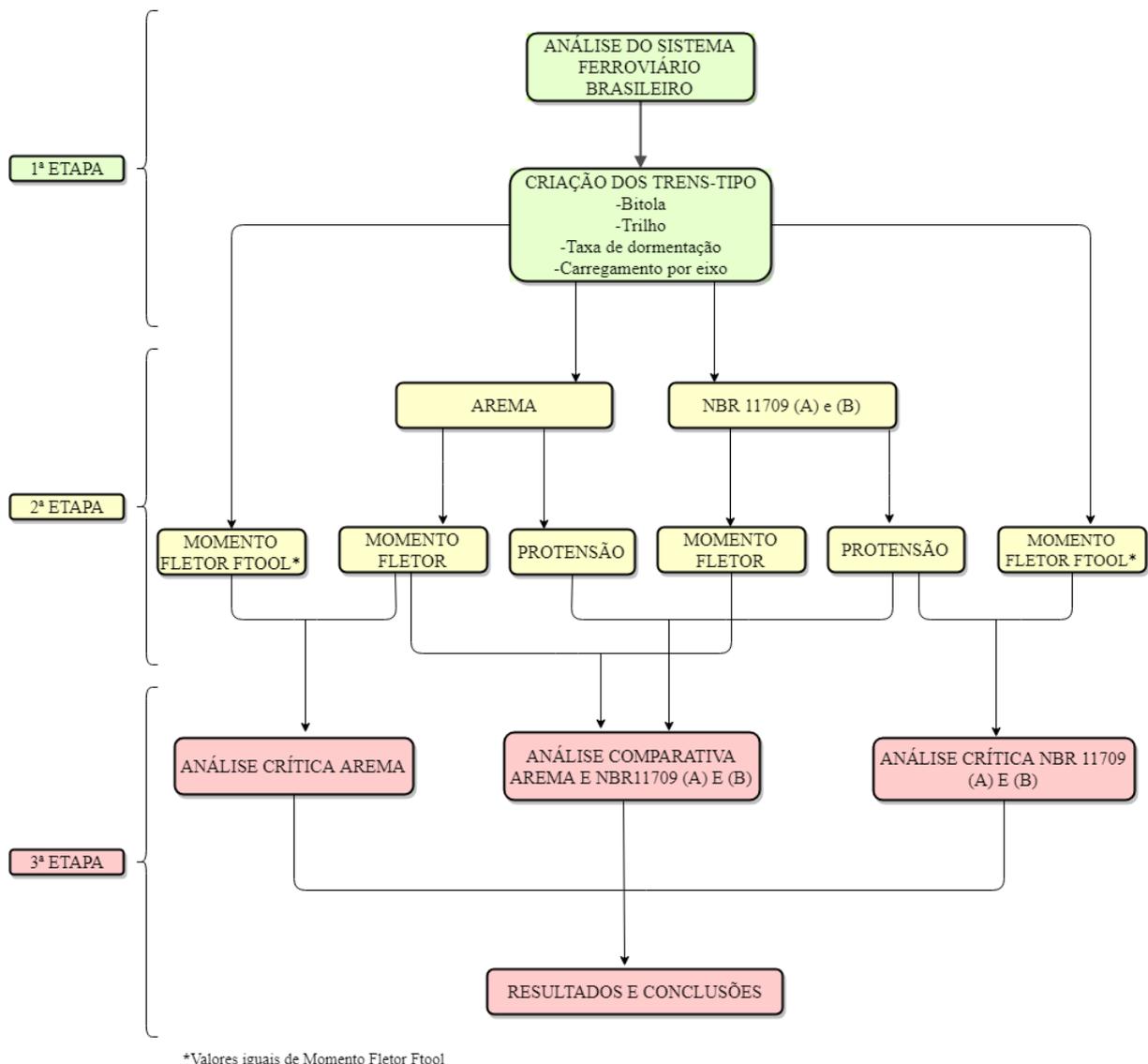


Figura 3.1- Esquema de etapas para o projeto final
Fonte: Elaborado pelo autor.

No decorrer do capítulo serão descritas com mais detalhes as etapas presentes na metodologia, juntamente com os objetivos almejados em cada uma delas. Cada etapa relaciona um passo que foi desenvolvido durante a execução do Projeto Final 2.

3.1. Etapa 1

Nesta etapa é necessário, primeiramente, analisar de forma geral os dormentes monoblocos de concreto. Nessa análise, é preciso levar em consideração que no Brasil existem três tipos de bitolas de ferrovias, e para cada bitola os esforços são diferentes. Dessa forma, será definido a bitola mais adequada para ser usada na análise.

Nesse compasso, após a definição de bitola, é preciso definir quais cargas atuarão nos dormentes. Como resultado da análise geral, será necessário definir o valor das cargas atuantes. Se faz relevante lembrar que os dormentes podem sofrer esforços excepcionais, os quais devem ser levados em consideração para essa análise e devem ser inclusos nos dimensionamentos das normas .

Em posse desses dados é possível prosseguir para a próxima etapa, levando elementos de cálculo que sejam suficientes e adequados para a realidade das ferrovias brasileiras. Para encontrar esses dados, é usada a bibliografia empregada nos capítulos anteriores.

3.2. Etapa 2

Baseado nos resultados obtidos na etapa 1, foi feito o cálculo dos Momentos Fletores calculados pelo *Software Ftool* atuantes em um dormente de concreto. Com isso, obteve-se um valor de Momento Fletor para cada carregamento e comprimento de dormente, que, nesse caso, foi utilizado para dormentes de 270, 275 e 280 centímetros. Para a realização dos cálculos foi utilizado também o programa *Microsoft Excel*.

No decorrer da etapa 2, foi calculado o Momento Fletor seguindo a orientação de cada norma estudada. Com isso, foi observado o comportamento de cada dormente de concreto, levando em consideração seu comprimento e carregamento.

Ademais, para auxiliar nessa análise, foram estudados os esforços de protensão utilizados nos casos de Momento Fletor Negativo Máximo para cada comprimento de dormente e norma utilizada. Tal análise se faz importante para compreender como a protensão no dormente se comporta de acordo com os Momentos Fletores calculados em norma. Com isso, é possível prosseguir para a próxima etapa.

3.3. Etapa 3

Com todos os dados obtidos nas etapas anteriores, chega-se à última etapa. Nessa fase, o foco é voltado para a comparação direta entre os Momentos Fletores calculados por cada norma e os Momentos Fletores Reais, aqueles calculados usando o *Software Ftool*. Nesse compasso, também é feita a análise crítica entre os valores de Momentos Fletores calculados pela norma AREMA e os Momentos Fletores calculados pela NBR 11709. Além disso, é comparada a diferença de protensão utilizando ambas as normas.

Por fim, analisando os supramencionados pontos, é possível definir para cada situação, isto é, para cada comprimento e carregamento, qual norma é mais indicada para dimensionar dormentes de concreto monobloco protendido, levando-se em consideração os Momentos Fletores calculados e os esforços de protensão.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Atualmente existem vários e diferentes critérios adotados para a determinação dos Momentos Fletores solicitantes no dormente demonstrando claramente as incertezas existentes, devido a grande variabilidade dos parâmetros mais importantes no projeto dos dormentes, entre os quais pode-se citar: influência das curvas sobre a carga da roda no trilho, forças de impacto, condições de apoio do dormente no lastro e sua variação ao longo do tempo, rigidez do trilho, do dormente e do lastro e propriedades elásticas do sistema de fixação do trilho. De modo que, de país para país ou de empresa para empresa, a metodologia e os parâmetros adotados podem ser muito diferentes.

Como consequência, o projeto de um dormente de concreto resulta muito mais do conjunto de experiências das empresas ferroviárias e fabricantes, acumuladas principalmente durante as últimas cinco décadas, do que de estudos teóricos. Há também a observar que por ser o dormente de concreto um produto comercial, a divulgação e o acesso às informações são muito restritos. Daí pode-se visualizar a grande dificuldade para se projetar um dormente de concreto adequado às condições das ferrovias brasileiras, pois as experiências, quando existem, são pouco divulgadas, além do fato de que as condições das vias brasileiras são muito diferentes das vias de outros países, principalmente no que se refere à manutenção periódica da via e dos veículos (BASTOS, 1999).

Entre outras, as duas mais importantes instituições que estudam e normalizam o projeto dos dormentes de concreto são: a *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA) e o *European Rail Research Institute* (ERRI), pertencente à *International Union of Railways* (UIC). As duas normas mais conhecidas são a da AREMA (1997) nos Estados Unidos e a do *European Committee for Standardization* - CEN (1996) - na Europa. Há também diversas outras especificações pertencentes às próprias empresas ferroviárias de todo o mundo (BASTOS, 1999). Dessa forma, é feita a comparação entre as normas AREMA e NBR 11709, além disso uma breve explicação sobre a norma do CEN.

4.1. Definição do trem tipo e elementos de projeto

Para que se possa apreciar a forma de dimensionamento e operação da linha férrea nas condições de transporte desejadas, deve ser definido, um ou mais “Trens-tipo”, trens que representam o mais próximo da realidade do transporte que irá ocorrer na linha férrea.

Essa escolha é fundamental, pois mediante a análise de comportamento e dimensões desses “trens-tipo”, chega-se a elementos básicos essenciais para o projeto da via, tais como: rampa máxima, extensão de rampas, distâncias entre pontos de cruzamento, extensão dos desvios, raios mínimos de curva, entre outros.

Como o foco do estudo são os dormentes de concreto monobloco protendido, não entraremos em detalhes sobre todos esses elementos básicos de via citados no parágrafo anterior. Os elementos necessários para a caracterização do trem tipo são: uso de via, velocidade, raio mínimo, bitola, trilho, taxa de dormentação e carga por eixo.

Visto isso, é possível definir que o uso da via será misto (para veículos de passageiro e carga), a velocidade máxima da via de 60km/h e raio mínimo de 245m, segundo a Figura 4.1. Os outros parâmetros serão detalhados nos próximos itens.

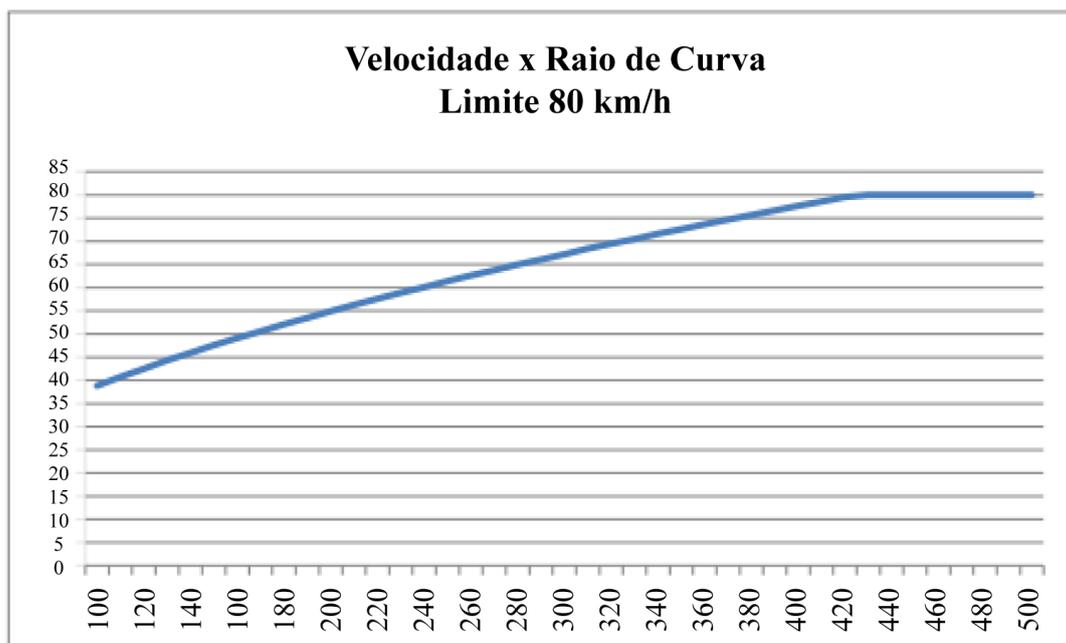


Figura 4.1- Velocidade Máxima em função do raio mínimo
Fonte: RUMO ALL, 2016.

4.1.1. Escolha das bitolas e trilhos

Considerando o que foi apresentado nos fundamentos teóricos desse trabalho e para determinação dos elementos de projeto, é necessário definir qual tipo de trilho e bitola (distância entre os trilhos) que deverá ser empregada para realizar o estudo.

Como visto nos capítulos anteriores, o Brasil possui três tipos de bitolas sendo usadas em suas ferrovias. Atualmente, as ferrovias brasileiras apresentam, em sua maioria, bitola de 1000mm. Porém a bitola de 1600mm vem ganhando destaque no cenário ferroviário, sendo a bitola adotada para novas ferrovias no país. Dessa forma, para o trem tipo é adotada a bitola larga, 1600mm.

Além disso, é necessário definir qual trilho será usado. Com isso, foi definido o trilho TR 68, pois é um tipo de trilho que apresenta especificações segundo o Procedimento para Inspeção de Material (PIM), elaborado pelo DNIT. A Figura 4.2 apresenta o trilho e suas dimensões.

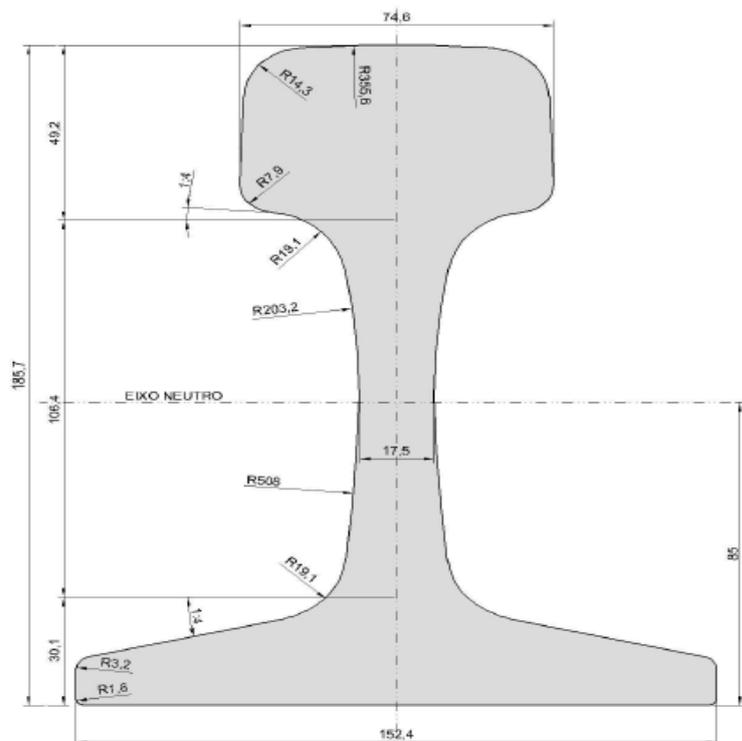


Figura 4.2- Trilho TR-68
Fonte: DNIT, 2015.

4.1.2. Taxa de dormentação

Outro importante dado a ser definido é a taxa de dormentação. Essa taxa representa a quantidade de dormentes utilizados para cada um quilômetro de ferrovia. Tal taxa se mostra importante, visto que representa o espaçamento entre cada dormente, além de ser necessária para a análise dos esforços nos trilhos.

A taxa de dormentação depende de dois fatores, o tipo de dormente e a bitola utilizada. Como para esse estudo foi utilizado dormente de concreto e bitola larga (1600mm) é recomendado uma taxa de dormentação de 1667 dormentes por quilômetro (SOARES, 2006). Além disso, a Tabela 4.1 apresenta essa taxa. Dessa forma, haverá um espaçamento de 60 cm entre cada par de dormente.

Tabela 4.1- Taxa de dormentação

Linhas	Quantida de dormentes por Km	Espaçamento (cm)
Tronco	1820	55
	1667	60
Subsidiárias	1540	65
	1420	70

Fonte: SOARES, 2006.

4.1.3. Carregamento por eixo

Para simular um carregamento tipo das ferrovias brasileiras é necessário levar em consideração as características de transporte do país. No caso brasileiro, os caminhos de ferro são, em sua maioria, responsáveis pelo transporte de carga, sendo baixo o transporte de passageiros.

Dessa forma, foi conversado com o orientador para simular um trem- tipo com uma carga por eixo de 16 toneladas, mais usual em transporte de passageiros; chegando até 32 toneladas, usual para transporte de carga, que é o caso do Brasil.

Porém, para o cálculo dos esforços segundo a AREMA, será adequado o tipo de carregamento apresentado pela norma americana para o carregamento utilizado neste estudo. Essa norma apresenta um quadro onde o carregamento é expresso como milhões de toneladas brutas (*Million Gross Tons- MGT*). Com isso, é feito uma relação entre MGT e carregamento por eixo em toneladas para que se possa trazer o modelo americano para a realidade desse estudo.

4.1.4. Trem tipo completo

Pelo que foi apresentado nos itens anteriores se chegou ao seguinte trem tipo apresentado na Tabela 4.2:

Tabela 4.2- Características Trens tipo

Númeração	Curva mínima (m)	Velocidade (km/h)	Bitola (mm)	Trilho	Espaçamento entre dormentes (cm)	Peso Eixo NBR 11709(T)	Carga Eixo (KN)
1	245	60	1600	TR-68	60	16	160
2	245	60	1600	TR-68	60	17	170
3	245	60	1600	TR-68	60	18	180
4	245	60	1600	TR-68	60	19	190
5	245	60	1600	TR-68	60	20	200
6	245	60	1600	TR-68	60	21	210
7	245	60	1600	TR-68	60	22	220
8	245	60	1600	TR-68	60	23	230
9	245	60	1600	TR-68	60	24	240
10	245	60	1600	TR-68	60	25	250
11	245	60	1600	TR-68	60	26	260
12	245	60	1600	TR-68	60	27	270
13	245	60	1600	TR-68	60	28	280
14	245	60	1600	TR-68	60	29	290
15	245	60	1600	TR-68	60	30	300
16	245	60	1600	TR-68	60	31	310
17	245	60	1600	TR-68	60	32	320

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Esforços nos dormentes

Teoricamente, a via férrea só deveria suportar os esforços resultantes dos pesos dos veículos e a força centrífuga exercida por estes nas curvas. Porém, a ação dos esforços normais é modificada pelos anormais, devido à própria via e ao material rodante, que desempenham um papel importante na resistência da via e derivam das características inerentes à mesma e em relação com as particularidades construtivas dos veículos (BRINA, 1983).

O perfeito conhecimento dos esforços que atuam sobre a via será útil, não só para se melhor dimensionar os elementos que a compõem, como também para identificar os defeitos que aparecem e corrigi-los mediante um serviço bem programado de manutenção (BRINA 1983).

Ademais, como o projeto é focado nos dormentes de concreto monobloco protendido, é especificado os esforços verticais, atuantes nos dormentes. Dessa forma, fica mais claro o trabalho dessa estrutura de concreto em uma ferrovia e como ele atua para suportar essas forças.

4.2.1. Esforços Verticais

Para se definir quais esforços verticais atuam em uma via férrea é preciso analisar inúmeros fatores como: força centrífuga vertical, movimento de galope, movimento de trepidação, defeitos na linha, defeitos do material rodante, entre outros. Porém para a análise dos dormentes de concreto será analisado apenas o carregamento vertical dos eixos das locomotivas, por serem esforços presentes continuamente na via e que apresentam o mesmo valor em toda a via.

Ademais, como a distância entre os eixos dos veículos de carga é grande o suficiente para o dormente sob um eixo não ter influência de um outro eixo mais próximo, o dormente será analisado considerando a força de apenas um eixo do veículo de carga, ou seja, de 160 kN a 320 kN para a NBR 11709 e AREMA. Devido à distância entre os eixos dos veículos, normalmente o dormente pode ser dimensionado em função da carga de um eixo apenas (BASTOS, 1999)

Importante se faz dizer sobre a forma do carregamento vertical nos dormentes de concreto monobloco protendido. Tal carregamento é vertical e pontual nos eixos dos trilhos, atuando na parte superior do dormente. Porém existe a força exercida do lastro sobre o dormente, na qual atua distribuídamente por toda parte inferior do dormente. Para ilustrar esse carregamento é apresentada a Figura 4.3.

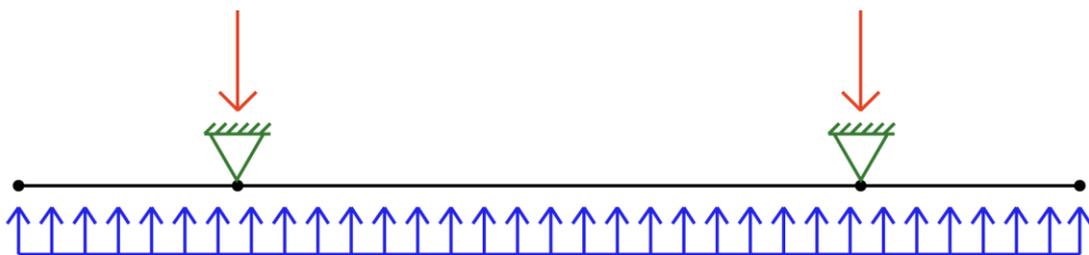


Figura 4.3- Carregamento atuante nos dormentes
Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, durante o projeto foi pensado em também comparar a forma de dimensionamento da CEN. Porém, foi concluído que não seria de grande valor essa comparação, visto que o carregamento que a norma do European Committee for Standardization recomenda é diferente, onde não leva em consideração os esforços atuantes no centro do dormente. Dessa forma, esta norma apresenta o modelo de carregamento da Figura 4.4.

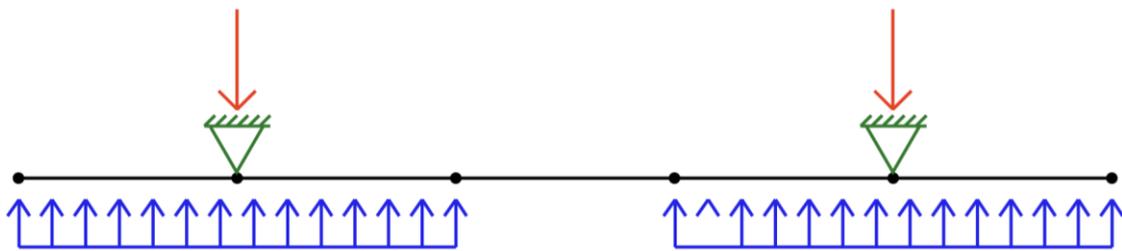


Figura 4.4- Carregamento segundo a CEN
 Fonte: Elaborado pelo autor

Ademais, o método de dimensionamento do CEN, utilizando esse tipo de carregamento, desconsidera o esforço mais danoso ao dormente monobloco de concreto, o Momento Fletor no centro do dormente. Tal fato é observado na Figura 4.5, onde deixa claro o porquê de não ser analisado o método comparativo dessa entidade, visto que não apresenta Momento Fletor negativo em seu centro.

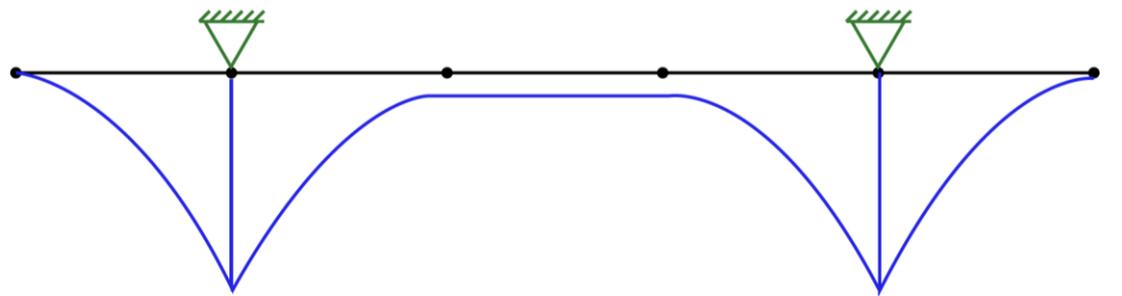


Figura 4.5- Momento Fletor pelo método CEN
 Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, esse tipo de modelo adotado pela CEN é mais utilizado para dormentes de concreto bi-bloco, que apresentam uma liga metálica no seu centro. Para Taylor (1996), a norma CEN, conduz a dormentes mais leves e menos resistentes que os dormentes projetados segundo a AREMA. É adequada às características das vias européias, onde a carga por eixo é menor e o tráfego de veículos de passageiros, em alta velocidade, impõem à via perfeitas condições, a fim de garantir conforto e segurança.

4.3. Momentos Fletores Reais

Para uma melhor análise dos Momentos Fletores atuantes nos dormentes, a fim de compará-los com o Momento Fletor apresentado em norma, foi feito o cálculo desses esforços positivos e

negativos em cada comprimento de dormente, levando em consideração apenas o carregamento.

Os valores de Momentos Fletores foram obtidos pelo programa *Ftool*, apresentando os Momentos Fletores máximos positivos e negativos. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.3- Momentos Fletores Reais- 280cm

Dormente 280			
Carga Eixo (KN)	Distribuido (KN/m)	Positivo (KN.m)	Negativo (KN.m)
160	57,1	10,3	8,0
170	60,7	10,9	8,5
180	64,3	11,6	9,0
190	67,9	12,2	9,5
200	71,4	12,9	10,0
210	75,0	13,5	10,5
220	78,6	14,1	11,0
230	82,1	14,8	11,5
240	85,7	15,4	12,0
250	89,3	16,1	12,5
260	92,9	16,7	13,0
270	96,4	17,4	13,5
280	100,0	18,0	14,0
290	103,6	18,6	14,5
300	107,1	19,3	15,0
310	110,7	19,9	15,5
320	114,3	20,6	16,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.4- Momentos Fletores Reais- 275cm

Dormente 275			
Carga Eixo (KN)	Distribuido (KN/m)	Positivo (KN.m)	Negativo (KN.m)
160	58,2	9,6	9,3
170	61,8	10,2	9,8
180	65,5	10,8	10,4
190	69,1	11,4	11,0
200	72,7	12,0	11,6
210	76,4	12,6	12,1
220	80,0	13,2	12,7
230	83,6	13,8	13,3
240	87,3	14,4	13,9
250	90,9	15,0	14,5
260	94,5	15,6	15,0
270	98,2	16,2	15,6
280	101,8	16,8	16,2
290	105,5	17,4	16,8
300	109,1	18,0	17,3
310	112,7	18,6	17,9
320	116,4	19,2	18,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.5- Momentos Fletores Reais- 270cm

Dormente 270			
Carga Eixo (KN)	Distribuido (KN/m)	Positivo (KN.m)	Negativo (KN.m)
160	59,3	9,0	10,0
170	63,0	9,5	10,6
180	66,7	10,1	11,3
190	70,4	10,6	11,9
200	74,1	11,2	12,5
210	77,8	11,8	13,1
220	81,5	12,3	13,8
230	85,2	12,9	14,4
240	88,9	13,4	15,0
250	92,6	14,0	15,6
260	96,3	14,6	16,3
270	100,0	15,1	16,9
280	103,7	15,7	17,5
290	107,4	16,2	18,1
300	111,1	16,8	18,8
310	114,8	17,4	19,4
320	118,5	17,9	20,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nesses dados apresentados é possível dar sequência ao estudo levando em consideração os Momentos Fletores reais que estão atuando no dormente de concreto.

4.4. Momentos Fletores de projeto AREMA

Para encontrar o Momento Fletor de projeto do manual da American Railway Engineering and Maintenance- of- Way Association é preciso encontrar alguns valores que estão atrelados ao trem tipo estabelecido nos capítulos anteriores. Para essa etapa são analisados dormentes de 270, 275 e 280 cm de comprimento e base contínua.

Para isso, o capítulo 30 do manual AREMA (2014), contém as devidas recomendações para a análise dos esforços no dormente de concreto monobloco protendido. Será levado em consideração os Momentos Fletores positivos no apoio do trilho sobre o dormente e o momento negativo no centro do dormente.

É importante considerar que a AREMA não fornece recomendações específicas sobre este processo de dimensionamento, deixando a análise a cargo da presença de tabelas e ábacos de orientação de cálculo. Dessa forma, a AREMA depende de testes empíricos para validar o dimensionamento (FRA, 2013).

Visto isso, buscando adaptar o modelo de cálculo desse manual, foi preciso fazer interpolações, extrapolações e cálculos estimativos para encontrar valores adequados entre a norma americana e o trem tipo usual atuante no Brasil. Essa forma para encontrar valores compatíveis ao dimensionamento de dormentes de comprimento diferente é apresentado na AREMA como forma para determinação de valores nos ábacos apresentados.

4.4.1. Carregamento distribuído

Segundo o capítulo 30 do manual AREMA são indicadas as cargas das rodas aplicadas ao trilho que serão distribuídas para os dormentes. As investigações de campo foram usadas para desenvolver uma estimativa conservadora de carga distribuída para um único dormente. Isso é mostrado na Figura 4.6 abaixo.

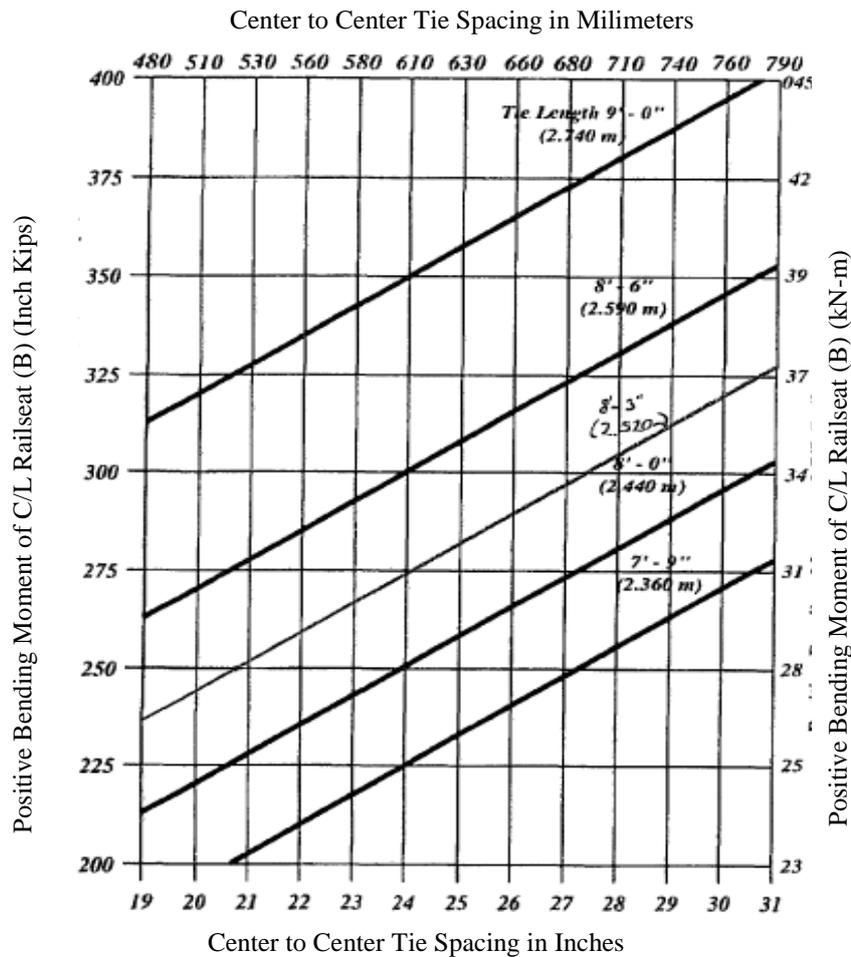


Figura 4.6- Espaço entre dormentes e B
Fonte: AREMA, 2014.

Como os dormentes escolhidos são de 270, 275 e 280 cm, comprimentos que não aparecem no quadro da AREMA, foi feito uma interpolação e extrapolação para determinação dos valores, método utilizado para a construção de ábacos presentes na norma. Com isso, foi definido os valores de B, que será utilizado futuramente para o cálculo dos dormentes, levando em consideração o espaçamento de 60cm entre essas estruturas de concreto. Dessa forma, a Tabela 4.6 apresenta os valores de B, convertidos para kN.m.

Tabela 4.6- Valores de B

Tamanho (cm)	B (Inch Kips)	B (kN.m)
280	369	41,69
275	349	39,43
274	345	38,98
270	329	37,17
259	285	32,20
252	270	30,50

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2. Fatores de tonelagem e velocidade

Os fatores de velocidade (V) e tonelagem (T) são determinados usando a Figura 4.7. Segundo os critérios estabelecidos essa via possui velocidade de 60 Km/h. Visto isso, será necessário a conversão de unidades para encontrar o valor na tabela.

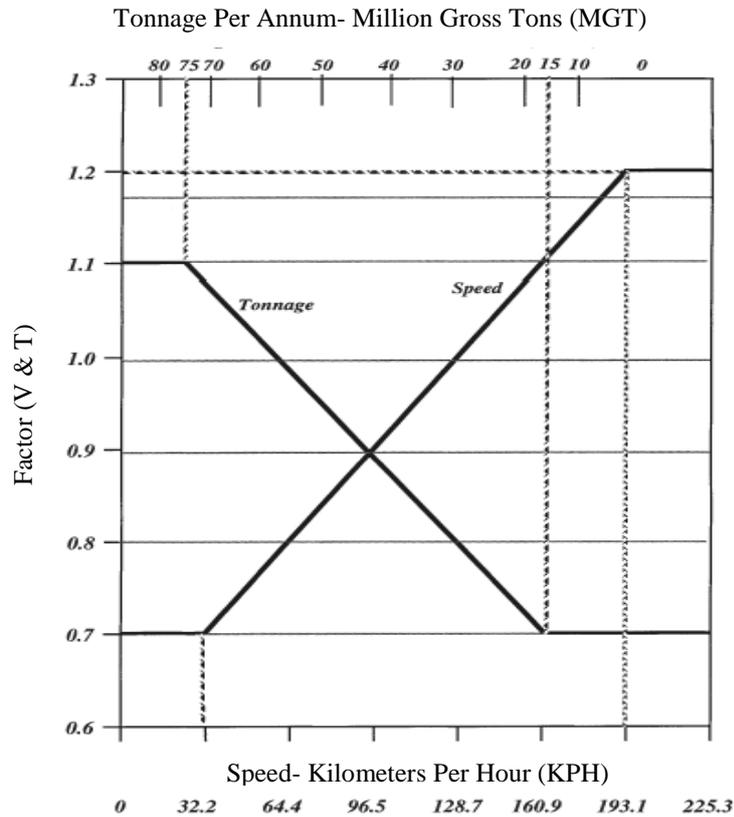


Figura 4.7- Fator V e T pela MGT
Fonte: AREMA, 2014.

Visto que o valor da velocidade é de 60 Km/h ou 37,3 mph, o valor do coeficiente V é de 0,75. Os outros valores referentes a tonelagem estão representados na Tabela 4.7, eles foram encontrados através de uma função estabelecida com valores já conhecidos.

Tabela 4.7- Valores de T para MGT

Carga Eixo (KN)	Valores de T
160	0,7
170	0,725
180	0,75
190	0,775
200	0,8
210	0,825
220	0,85
230	0,875
240	0,9
250	0,925
260	0,95
270	0,975
280	1
290	1,025
300	1,05
310	1,075
320	1,1

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.3. Momentos Fletores calculados

Agora, com os valores de B, V e T é possível encontrar o Momento Fletor de projeto. Esse valor é encontrado utilizando a Equação 1, onde se multiplica todos esses fatores.

$$M = B \cdot V \cdot T$$

Equação 1

Onde:

M= Momento Fletor de projeto (kN.m)

B= Fator de momento (kN.m)

V= Fator de Velocidade

T= Fator de Tonelagem

Com o valor de M é necessário usar a Tabela 4.8 para encontrar os devidos Momentos Fletores. Como a norma AREMA não apresentava valores para o tamanho dos dormentes que estão sendo trabalhados, foram interpolados os valores, chegando aos coeficientes apresentados a seguir.

Tabela 4.8- Coeficientes de ponderação

Comprimento (cm)	Momento negativo apoio trilho	Momento Negativo Centro	Momento Positivo Centro
280	0,43	0,53	0,37
275	0,45	0,56	0,39
274	0,46	0,57	0,4
270	0,48	0,6	0,42
259	0,53	0,67	0,47
252	0,58	0,7	0,51
244	0,64	0,92	0,56

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.4. Resultados

Agora encontrando o valor de Momento Fletor em cada situação é possível analisar para cada tipo de dormente monobloco de concreto protendido o seu comportamento atrelado ao seu comprimento. A sequência de Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam seus Momentos Fletores.

Tabela 4.9- Momentos Fletores 280 cm

Dormente de 280 cm		
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo no apoio 280 (kN.m)	Momento negativo centro 280 (kN.m)
160	21,89	11,60
170	22,67	12,01
180	23,45	12,43
190	24,23	12,84
200	25,01	13,26
210	25,80	13,67
220	26,58	14,09
230	27,36	14,50
240	27,36	14,50
250	28,14	14,91
260	28,92	15,33
270	29,70	15,74
280	30,49	16,16
290	31,27	16,57
300	32,05	16,99
310	32,83	17,40
320	33,61	17,81

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.10- Momentos Fletores 275 cm

Dormente de 275 cm		
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo no apoio 275 (kN.m)	Momento negativo centro 275 (kN.m)
160	20,70	11,59
170	21,44	12,01
180	22,18	12,42
190	22,92	12,83
200	23,66	13,25
210	24,40	13,66
220	25,14	14,08
230	25,88	14,49
240	26,62	14,90
250	27,35	15,32
260	28,09	15,73
270	28,83	16,15
280	29,57	16,56
290	30,31	16,97
300	31,05	17,39
310	31,79	17,80
320	32,53	18,22

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.11- Momentos Fletores 270 cm

Dormente de 270 cm		
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo no apoio 270 (kN.m)	Momento negativo centro 270 (kN.m)
160	19,51	11,71
170	20,21	12,13
180	20,91	12,55
190	21,61	12,96
200	22,30	13,38
210	23,00	13,80
220	23,70	14,22
230	24,39	14,64
240	25,09	15,05
250	25,79	15,47
260	26,48	15,89
270	27,18	16,31
280	27,88	16,73
290	28,57	17,14
300	29,27	17,56
310	29,97	17,98
320	30,67	18,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, é possível observar que o valor dos Momentos Fletores positivos, atuantes no apoio do trilho, aumentam inversamente proporcional ao comprimento do dormente. De outra forma, os Momentos Fletores negativos, atuantes no centro do dormente, decrescem com o aumento do comprimento do dormente.

Nesse compasso, foi feita uma comparação entre os valores dos Momentos Fletores reais e os Momentos Fletores calculados pela norma AREMA. A partir dessa comparação foi possível recomendar ou não do dimensionamento segundo a norma AREMA de acordo com o comprimento e carregamento do dormente de concreto monobloco protendido. Esses dados estão apresentados nas Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14.

Tabela 4.12- Recomendação- 280 cm

Dormente de 280 cm						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo no Apoio 280 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento negativo centro 280 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	21,89	112,79	recomendado	11,60	45,00	recomendado
170	22,67	107,43	recomendado	12,01	41,35	recomendado
180	23,45	102,66	recomendado	12,43	38,10	recomendado
190	24,23	98,39	recomendado	12,84	35,19	recomendado
200	25,01	94,55	recomendado	13,26	32,57	recomendado
210	25,80	91,08	recomendado	13,67	30,21	recomendado
220	26,58	87,92	recomendado	14,09	28,05	recomendado
230	27,36	85,04	recomendado	14,50	26,09	recomendado
240	27,36	77,33	recomendado	14,50	20,83	recomendado
250	28,14	75,10	recomendado	14,91	19,32	recomendado
260	28,92	73,04	recomendado	15,33	17,91	recomendado
270	29,70	71,13	recomendado	15,74	16,62	recomendado
280	30,49	69,36	recomendado	16,16	15,41	recomendado
290	31,27	67,72	recomendado	16,57	14,29	recomendado
300	32,05	66,18	recomendado	16,99	13,24	recomendado
310	32,83	64,74	recomendado	17,40	12,26	recomendado
320	33,61	63,39	recomendado	17,81	11,34	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.13- Recomendação- 275 cm

Dormente de 275 cm						
Carga Eixo (KN)	Momento Calculado 275 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento negativo centro 275 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	20,70	115,23	recomendado	11,59	25,31	recomendado
170	21,44	109,80	recomendado	12,01	22,15	recomendado
180	22,18	104,98	recomendado	12,42	19,34	recomendado
190	22,92	100,66	recomendado	12,83	16,83	recomendado
200	23,66	96,78	recomendado	13,25	14,57	recomendado
210	24,40	93,26	recomendado	13,66	12,52	recomendado
220	25,14	90,07	recomendado	14,08	10,66	recomendado
230	25,88	87,15	recomendado	14,49	8,97	recomendado
240	26,62	84,48	recomendado	14,90	7,41	recomendado
250	27,35	82,02	recomendado	15,32	5,98	recomendado
260	28,09	79,75	recomendado	15,73	4,66	recomendado
270	28,83	77,65	recomendado	16,15	3,43	recomendado
280	29,57	75,69	recomendado	16,56	2,29	recomendado
290	30,31	73,88	recomendado	16,97	1,24	recomendado
300	31,05	72,18	recomendado	17,39	0,25	recomendado
310	31,79	70,59	recomendado	17,80	-0,67	não recomendado
320	32,53	69,11	recomendado	18,22	-1,54	não recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.14- Recomendação- 270 cm

Dormente de 270 cm						
Carga Eixo (KN)	Momento Calculado 270 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento negativo centro 270 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	19,51	117,72	recomendado	11,71	17,09	recomendado
170	20,21	112,23	recomendado	12,13	14,14	recomendado
180	20,91	107,36	recomendado	12,55	11,51	recomendado
190	21,61	102,99	recomendado	12,96	9,16	recomendado
200	22,30	99,06	recomendado	13,38	7,05	recomendado
210	23,00	95,51	recomendado	13,80	5,14	recomendado
220	23,70	92,28	recomendado	14,22	3,40	recomendado
230	24,39	89,32	recomendado	14,64	1,81	recomendado
240	25,09	86,62	recomendado	15,05	0,36	recomendado
250	25,79	84,13	recomendado	15,47	-0,98	não recomendado
260	26,48	81,83	recomendado	15,89	-2,21	não recomendado
270	27,18	79,71	recomendado	16,31	-3,36	não recomendado
280	27,88	77,73	recomendado	16,73	-4,42	não recomendado
290	28,57	75,89	recomendado	17,14	-5,41	não recomendado
300	29,27	74,18	recomendado	17,56	-6,33	não recomendado
310	29,97	72,57	recomendado	17,98	-7,19	não recomendado
320	30,67	71,07	recomendado	18,40	-8,00	não recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, pelo exposto nas tabelas acima é possível analisar a existência de uma margem de segurança maior para o Momento Fletor Positivo do que para o Momento Fletor Negativo, além disso, quanto menor o comprimento do dormente menor essa margem de segurança para o Momento Fletor atuante no centro do dormente. Visto isso, existem alguns comprimentos e carregamentos que não são recomendados para dimensionamento seguindo a norma da AREMA.

4.5. Momentos Fletores de projeto NBR 11709

Segundo a NBR 11709/15- Dormente de Concreto- Projeto, Materiais e Componentes, é possível encontrar os Momentos Fletores dos dormentes de concreto monobloco protendido por duas formas de cálculo, A ou B.

Visto isso, será feito o cálculo utilizando dormentes de 270, 275 e 280 cm de comprimento e base constante, pelos dois métodos. Esses métodos, A e B, estão presentes nos anexos C e D da norma brasileira.

Diferente do método AREMA, a NBR11709 apresenta um método mais racional, calculando fatores e com esses fatores é possível chegar aos momentos atuantes. Outro ponto importante de se levantar é que a Norma Brasileira é voltada para bitola de 1,60m e dormentes maiores, diferente do método americano. Com isso, será apresentado os momentos calculados segundo o método A e B.

4.5.1. Carga de Projeto (F_d)

A superestrutura da via permanente, composta pela grade (trilhos, dormentes e fixações dos trilhos) apoiada sobre o lastro, sublastro e plataforma, ou outro meio elástico similar, pode ser considerada como uma viga contínua sobre apoio elástico. Com base neste conceito, o fator de distribuição de carga (D_f) é aplicado para considerar o fato de que qualquer carga aplicada à via pelo material rodante é distribuída, por intermédio dos trilhos, sobre vários dormentes consecutivos. Esta distribuição da carga de roda (Q) depende fundamentalmente do espaçamento dos dormentes e eixos do material rodante, da reação do lastro e sublastro e da rigidez do trilho. (NBR 1170, 2015)

A carga de projeto (F_d) é a carga de referência para o dimensionamento dos dormentes de concreto. A partir de F_d devem ser calculados os requisitos de desempenho à flexão, ou seja, os Momentos Fletores positivos e negativos máximos que atuam nas seções transversais principais do dormente (NBR 11709, 2015).

A carga de projeto equivale à carga estática de roda (Q) multiplicada pelos fatores de distribuição de carga (D_f) e Incremento estático (I_e), como demonstrado na Equação 2 a seguir:

$$F_d = Q * D_f * I_e$$

Equação 2

Segundo a NBR 11709, quando não especificado de outra forma pelo comprador, os seguintes valores de incremento estático de projeto (I_e) devem ser utilizados no cálculo da carga estática de projeto:

- a) $I_e = 1,5$ (no dimensionamento estrutural de dormentes para caminhos de rolamento);
- b) $I_e = 1,1$ (nas demais verificações sob solicitação estática ou quase estática).

Nesse compasso, a carga de projeto será a mesma utilizada para a análise dos métodos A e B. Além disso, essa carga, atrelada a carga estática do trem- tipo está representada da seguinte forma, segundo a Tabela 4.15:

Tabela 4.15- Fator de Distribuição e Carga por eixo

Carga Eixo (kN)	Fato de Distribuição (kN)
160,00	63,63
170,00	67,61
180,00	71,58
190,00	75,56
200,00	79,54
210,00	83,51
220,00	87,49
230,00	91,47
240,00	95,44
250,00	99,42
260,00	103,40
270,00	107,37
280,00	111,35
290,00	115,33
300,00	119,30
310,00	123,28
320,00	127,26

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2. Momento de Projeto Método A (M_d)

O Momento Fletor de projeto (M_d) deve corresponder ao Momento Fletor positivo máximo que atua na seção transversal do centro da mesa de apoio do trilho, resultante da aplicação, sobre o dormente de concreto, da carga de projeto (F_d) ou, no caso de caminhos de rolamento e

situações de solicitação quase estática, a carga estática de projeto, nas condições consideradas para o apoio do dormente sobre o lastro (NBR 11709, 2015).

No caso dos dormentes monobloco, o esquema simplificado de carregamento e reação do lastro mostrado na Figura 4.8 possibilita o cálculo analítico do Momento Fletor de projeto (M_d) (NBR 11709, 2015).

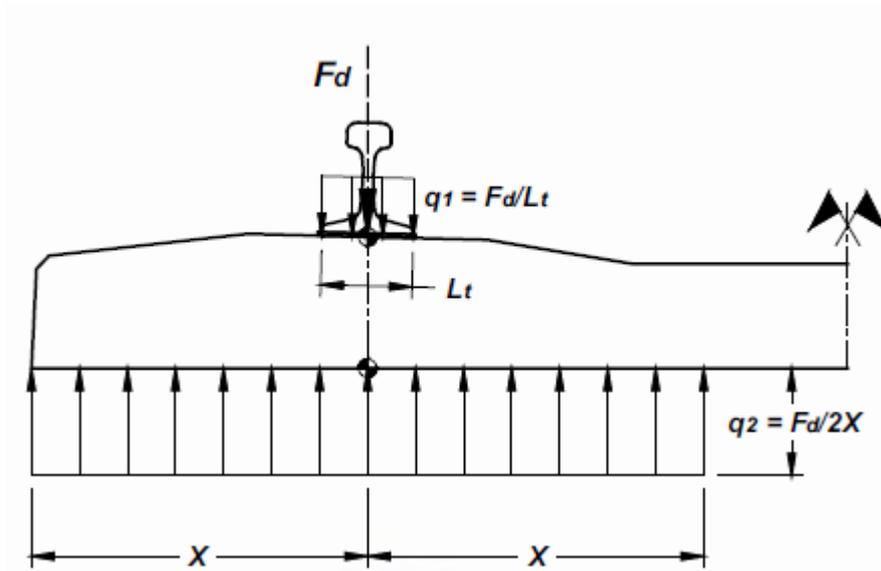


Figura 4.8- Carregamento no apoio do trilho
Fonte: NBR 11709, 2015

Nessas condições, o Momento Fletor de projeto (M_d) pode ser calculado de acordo com a Equação 3:

$$M_d = \phi * \frac{F_d}{4} \left(X - \frac{L_t}{2} \right)$$

Equação 3

Onde:

M_d é o valor numérico do Momento Fletor de projeto, expresso em quilonewtons metro (kN.m);

ϕ é o fator de correção do Momento Fletor de projeto, cujo valor adimensional, neste caso, é igual a 1,14;

F_d é o valor numérico da carga de projeto, expresso em quilonewtons (kN);

X é o valor numérico do comprimento da cabeceira do dormente, expresso em metros (m);

L_t é o valor numérico da largura do patim do trilho, expresso em metros (m), para o trilho TR-68, 0,152;.

4.5.3. Momento Fletor Negativo no centro do dormente Método A

O esquema simplificado de carregamento e reação do lastro mostrado na Figura 4.9 possibilita o cálculo analítico do Momento Fletor negativo no centro do dormente monobloco (NBR 11709).

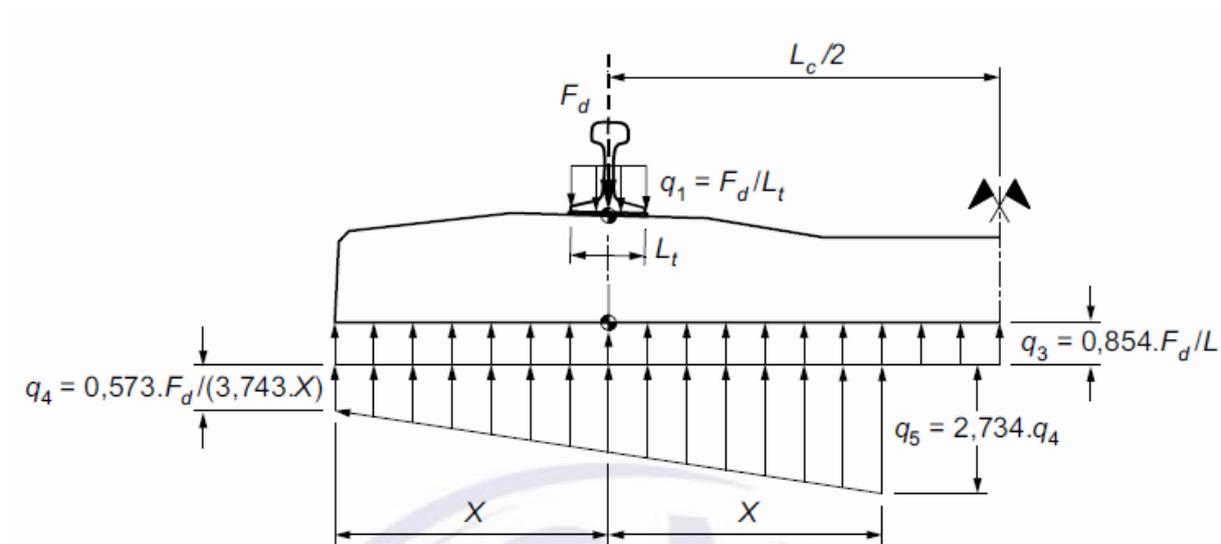


Figura 4.9- Carregamento para o Centro do Trilho
Fonte: NBR 11709, 2015

Nessas condições, o Momento Fletor negativo no centro do dormente pode ser calculado de acordo com a seguinte Equação 4:

$$M_c = \frac{F_d}{2} \left(1,573 \cdot \frac{L}{2} - \frac{29,247 \cdot X}{22,1} - L_c \right)$$

Equação 4

Onde:

M_c é o valor numérico do Momento Fletor negativo no centro do dormente, expresso em quilonewtons metro (kN.m);

F_d é o valor numérico da carga de projeto, expresso em quilonewtons (kN);

L é o valor numérico do comprimento total do dormente, expresso em metros (m);

X é o valor numérico do comprimento da cabeceira do dormente, expresso em metros (m);

L_c é o valor numérico da distância entre os centros das mesas de apoio dos trilhos, expresso

em metros (m), no caso 1,75m.

4.5.4. Momento de Projeto Método B (Md)

No caso dos dormentes monobloco, o esquema simplificado de carregamento e condições de apoio mostrado na Figura 4.10 possibilita o cálculo analítico do Momento Fletor de projeto (Md).

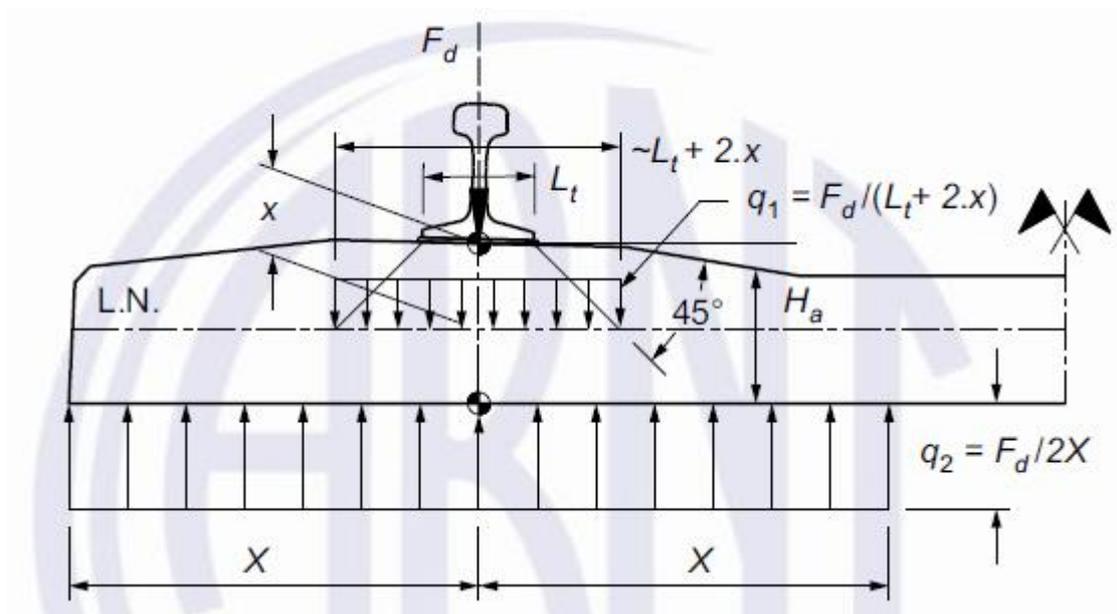


Figura 4.10- Esforços no dormente Método B
Fonte: NBR 11709, 2015

Nessas condições, o Momento Fletor de projeto (Md) pode ser calculado de acordo com a seguinte Equação 5:

$$Md = \Psi * \frac{Fd}{4} \left[X - \frac{(Lt+2x)}{2} \right]$$

Equação 5

Onde:

Md é o valor numérico do Momento Fletor de projeto, expresso em quilonewtons metro (kN.m);

Fd é o valor numérico da carga de projeto, expresso em quilonewtons (kN);

X é o valor numérico do comprimento da cabeceira do dormente, expresso em metros (m);

Lt é o valor numérico da largura do patim do trilho, expresso em metros (m), para trilho TR-68 é de 0,152m;

x é o valor numérico da profundidade da linha neutra, expresso em metros (m), nesse caso 0,1313m;

Ψ é o fator de majoração do Momento Fletor de projeto devido a irregularidades no apoio longitudinal do dormente, cujo valor adimensional é igual a 1,6.

4.5.5. Momento Fletor Negativo no centro do dormente Método B

Para encontrar esse valor a norma apresenta cálculos diferentes para dormentes de seção constante e seção diferente. Como nesse projeto está sendo usado dormente de seção constante, será seguido a recomendação da norma.

Dessa forma, a NBR 11709 recomenda que o cálculo dos Momentos Fletores negativos seja feito como expresso no item 4.5.3 deste trabalho.

4.5.6. Resultados Comparativos

Os resultados para comparação dos momentos calculados estão expressos nas tabelas a seguir. É possível analisar quando o Momento Fletor de Projeto ou Momento Fletor Positivo é maior do que o Momento Fletor Máximo no centro para o Método B. Porém no Método A os valores de Momentos Fletores positivos e negativos são mais próximos um do outro. Além disso, é possível através da comparação entre os Momentos Fletores reais e Momento Fletores calculados pela norma, recomendar ou não recomendar o dimensionamento pela norma brasileira de acordo com cada carregamento e comprimento de dormente. As Tabelas a seguir apresentam as recomendações.

Tabela 4.16- Dormente de 280 cm Método A

Caso A 280						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo A 280 (KN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento Negativo A 280 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	9,50	-7,62	não recomendado	-10,88	35,94	recomendado
170	11,56	5,78	recomendado	-11,56	35,94	recomendado
180	12,24	5,78	recomendado	-12,23	35,94	recomendado
190	12,92	5,78	recomendado	-12,91	35,94	recomendado
200	13,60	5,78	recomendado	-13,59	35,94	recomendado
210	14,28	5,78	recomendado	-14,27	35,94	recomendado
220	14,96	5,78	recomendado	-14,95	35,94	recomendado
230	15,64	5,78	recomendado	-15,63	35,94	recomendado
240	16,32	5,78	recomendado	-16,31	35,94	recomendado
250	17,00	5,78	recomendado	-16,99	35,94	recomendado
260	17,68	5,78	recomendado	-17,67	35,94	recomendado
270	18,36	5,78	recomendado	-18,35	35,94	recomendado
280	19,04	5,78	recomendado	-19,03	35,94	recomendado
290	19,72	5,78	recomendado	-19,71	35,94	recomendado
300	20,40	5,78	recomendado	-20,39	35,94	recomendado
310	21,08	5,78	recomendado	-21,07	35,94	recomendado
320	21,76	5,78	recomendado	-21,75	35,94	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.17- Dormente de 280 cm Método B

Caso B 280						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo B 280 (KN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento Negativo B 280 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	10,00	-2,82	não recomendado	-10,88	35,94	recomendado
170	12,11	10,86	recomendado	-11,56	35,94	recomendado
180	17,18	48,47	recomendado	-12,23	35,94	recomendado
190	18,13	48,47	recomendado	-12,91	35,94	recomendado
200	19,09	48,47	recomendado	-13,59	35,94	recomendado
210	20,04	48,47	recomendado	-14,27	35,94	recomendado
220	21,00	48,47	recomendado	-14,95	35,94	recomendado
230	21,95	48,47	recomendado	-15,63	35,94	recomendado
240	22,91	48,47	recomendado	-16,31	35,94	recomendado
250	23,86	48,47	recomendado	-16,99	35,94	recomendado
260	24,82	48,47	recomendado	-17,67	35,94	recomendado
270	25,77	48,47	recomendado	-18,35	35,94	recomendado
280	26,72	48,47	recomendado	-19,03	35,94	recomendado
290	27,68	48,47	recomendado	-19,71	35,94	recomendado
300	28,63	48,47	recomendado	-20,39	35,94	recomendado
310	29,59	48,47	recomendado	-21,07	35,94	recomendado
320	30,54	48,47	recomendado	-21,75	35,94	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.18- Dormente de 275 cm Método A

Caso A 275						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo A 275 (KN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento Negativo A 275 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	10,43	8,41	recomendado	-11,07	19,71	recomendado
170	11,08	8,41	recomendado	-11,77	19,71	recomendado
180	11,73	8,41	recomendado	-12,46	19,71	recomendado
190	12,38	8,41	recomendado	-13,15	19,71	recomendado
200	13,03	8,41	recomendado	-13,84	19,71	recomendado
210	13,69	8,41	recomendado	-14,53	19,71	recomendado
220	14,34	8,41	recomendado	-15,23	19,71	recomendado
230	14,99	8,41	recomendado	-15,92	19,71	recomendado
240	15,64	8,41	recomendado	-16,61	19,71	recomendado
250	16,29	8,41	recomendado	-17,30	19,71	recomendado
260	16,94	8,41	recomendado	-17,99	19,71	recomendado
270	17,60	8,41	recomendado	-18,69	19,71	recomendado
280	18,25	8,41	recomendado	-19,38	19,71	recomendado
290	18,90	8,41	recomendado	-20,07	19,71	recomendado
300	19,55	8,41	recomendado	-20,76	19,71	recomendado
310	20,20	8,41	recomendado	-21,46	19,71	recomendado
320	20,85	8,41	recomendado	-22,15	19,71	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.19- Dormente de 275 cm Método B

Caso B 275						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo B 275(KN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento Negativo B 275 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	14,63	52,16	recomendado	-11,07	19,71	recomendado
170	15,55	52,16	recomendado	-11,77	19,71	recomendado
180	16,46	52,16	recomendado	-12,46	19,71	recomendado
190	17,38	52,16	recomendado	-13,15	19,71	recomendado
200	18,29	52,16	recomendado	-13,84	19,71	recomendado
210	19,21	52,16	recomendado	-14,53	19,71	recomendado
220	20,12	52,16	recomendado	-15,23	19,71	recomendado
230	21,04	52,16	recomendado	-15,92	19,71	recomendado
240	21,95	52,16	recomendado	-16,61	19,71	recomendado
250	22,87	52,16	recomendado	-17,30	19,71	recomendado
260	23,78	52,16	recomendado	-17,99	19,71	recomendado
270	24,70	52,16	recomendado	-18,69	19,71	recomendado
280	25,61	52,16	recomendado	-19,38	19,71	recomendado
290	26,53	52,16	recomendado	-20,07	19,71	recomendado
300	27,44	52,16	recomendado	-20,76	19,71	recomendado
310	28,35	52,16	recomendado	-21,46	19,71	recomendado
320	29,27	52,16	recomendado	-22,15	19,71	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.20- Dormente de 270cm Método A

Caso A 270						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo A 270 (KN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento Negativo A 270 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	9,97	11,28	recomendado	-11,27	12,72	recomendado
170	11,08	16,34	recomendado	-11,98	12,72	recomendado
180	11,73	16,34	recomendado	-12,68	12,72	recomendado
190	12,38	16,34	recomendado	-13,39	12,72	recomendado
200	13,03	16,34	recomendado	-14,09	12,72	recomendado
210	13,69	16,34	recomendado	-14,79	12,72	recomendado
220	14,34	16,34	recomendado	-15,50	12,72	recomendado
230	14,99	16,34	recomendado	-16,20	12,72	recomendado
240	15,64	16,34	recomendado	-16,91	12,72	recomendado
250	16,29	16,34	recomendado	-17,61	12,72	recomendado
260	16,94	16,34	recomendado	-18,32	12,72	recomendado
270	17,60	16,34	recomendado	-19,02	12,72	recomendado
280	18,25	16,34	recomendado	-19,73	12,72	recomendado
290	18,90	16,34	recomendado	-20,43	12,72	recomendado
300	19,55	16,34	recomendado	-21,14	12,72	recomendado
310	20,20	16,34	recomendado	-21,84	12,72	recomendado
320	20,85	16,34	recomendado	-22,54	12,72	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.21- Dormente de 270 cm Método B

Caso B 270						
Carga Eixo (KN)	Momento Positivo B 270 (KN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação	Momento Negativo B 270 (kN.m)	Diferença entre real e norma (%)	Recomendação
160	14,00	56,18	recomendado	-11,27	12,72	recomendado
170	14,87	56,18	recomendado	-11,98	12,72	recomendado
180	15,75	56,18	recomendado	-12,68	12,72	recomendado
190	16,62	56,18	recomendado	-13,39	12,72	recomendado
200	17,50	56,18	recomendado	-14,09	12,72	recomendado
210	18,37	56,18	recomendado	-14,79	12,72	recomendado
220	19,25	56,18	recomendado	-15,50	12,72	recomendado
230	20,12	56,18	recomendado	-16,20	12,72	recomendado
240	21,00	56,18	recomendado	-16,91	12,72	recomendado
250	21,87	56,18	recomendado	-17,61	12,72	recomendado
260	22,75	56,18	recomendado	-18,32	12,72	recomendado
270	23,62	56,18	recomendado	-19,02	12,72	recomendado
280	24,50	56,18	recomendado	-19,73	12,72	recomendado
290	25,37	56,18	recomendado	-20,43	12,72	recomendado
300	26,25	56,18	recomendado	-21,14	12,72	recomendado
310	27,12	56,18	recomendado	-21,84	12,72	recomendado
320	28,00	56,18	recomendado	-22,54	12,72	recomendado

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nessa comparação é possível observar que a diferença do Momento Fletor Real para o Momento Fletor Positivo calculado pela norma é maior quanto menor o comprimento do dormente. Além disso, é observado que o cálculo com o método A para Momentos Fletores Positivos é menos rigoroso que o método B, sendo a diferença entre os valores reais e os de norma menores.

Entretanto, para a comparação do Momento Fletor no centro do dormente, é perceptível que com o maior comprimento do dormente menor o Momento Fletor no centro. Mas o fato relevante dessa análise é que quanto maior o comprimento do dormente mais rigorosa é a norma em comparação com o Momento Fletor Real. Por fim, os valores do Momento Fletor no centro do dormente de concreto de base constante encontrados pelo método de cálculo A ou B, não modifica valor final.

4.6. Dimensionamento da Protensão

Para a análise das dimensões dos dormentes é importante levar em consideração o comprimento, os esforços atuantes, a posição da protensão, largura, entre outros. Baseado nisso, é feito um dimensionamento do dormente e calculada a protensão utilizada para as normas americana e brasileira.

Os dormentes protendidos necessitam de um comprimento para a fixação dos fios de protensão. As tendências são de aumentar os comprimentos dos dormentes, obtendo assim, uma área de suporte do dormente maior com a consequente diminuição de pressão sobre o lastro (TOSHIMITSU, KAINEN, 1980).

Sobre a largura se nota que quando o espaçamento entre os dormentes é constante, obtém-se menor pressão sobre o lastro com o aumento da largura, portanto quanto maior a largura do dormente menor será a carga atuante no lastro. Por outro lado, quanto maior a largura do dormente maior será a dificuldade de socaria abaixo dos dormentes (TOSHIMITSU, KAINEN, 1980).

O aumento da resistência dos dormentes contribui para distribuição econômica dos esforços horizontais, neste caso, é conveniente que o espaçamento entre os dormentes seja maior.

Entretanto, como o espaçamento entre os dormentes é uniforme ao longo de uma mesma via, é econômico trabalhar com dormentes de menor largura (TOSHIMITSU, KAINEN, 1980).

Por conseguinte analisando a altura se percebe que influi diretamente nos valores dos Momentos de Inércia e no peso do dormente. Portanto, quanto mais alto for o dormente maior será a resistência aos esforços horizontais. Por outro lado, quanto mais alto for o dormente maior será o custo tanto do dormente como também do lastro. Além disso, aumenta o Momento de Torção atuante no dormente podendo causar o seu rompimento (TOSHIMITSU, KAINEN, 1980).

Como os dormentes protendidos são curtos, comparados com as demais estruturas, é impossível introduzir ferragens (fios de pretensão) dobradas dentro dele. Entretanto, as cargas provenientes do material rodante produzem Momentos Fletores máximos no meio do vão (negativo) e debaixo dos trilhos (positivos), para combatê-los são necessários que essas partes altamente solicitadas estejam com pretensão elevadas. Como os fios de pretensão são instalados retos, uma das maneiras de aplicar pretensão na parte superior e na parte inferior, dessa forma foi elaborado um dormente seguindo as seguintes dimensões apresentadas nas Figura 4.11.

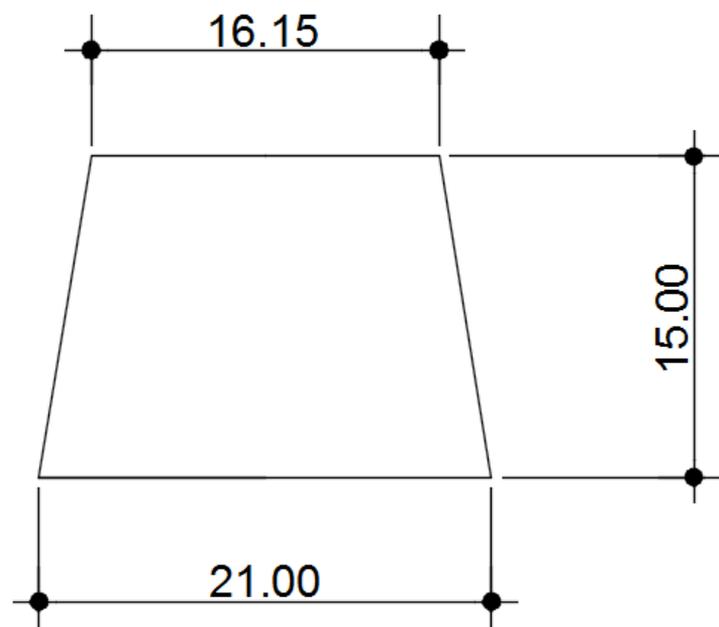


Figura 4.11- Dimensão do Dormente
Fonte: Elaborado pelo autor

4.6.1. Protensão

Para o cálculo da protensão foi utilizado as dimensões do dormente de concreto apresentado no item anterior. Dessa forma foi possível encontrar valores importantes, como : Momento de Inércia, tensão superior e inferior e centro de gravidade.

Com isso foi feita a protensão utilizando os valores de máximo Momento Fletor no centro do dormente, local menos resistente do dormente de concreto. Por sua vez, os valores de máximo Momento Fletor Negativo estão expressos na Tabela 4.22..

Tabela 4.22- Momento Fletor Negativo

Momento Fletor Negativo						
Norma	AREMA			NBR 11709 A/B		
Comprimento (cm)	280	275	270	280	275	270
Momento Fletor (KN.m)	17,81	18,22	18,40	21,75	22,14	22,54

Fonte: Elaborado pelo autor

Outros valores importantes para o cálculo da protensão são o Momento de Inércia, o centro de gravidade e a área do dormente apresentado. Esses valores estão apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23- Dados do Dormente

Momento de Inércia (cm⁴)	Centro de Gravidade (cm)	Área (cm²)
5194,5	7,17	278,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, foi calculado as tensões atuantes na parte superior e inferior do dormente. Para esse cálculo foram usadas as Equações 6 e 7 respectivamente.

$$\sigma = \frac{M}{I_x} * y_1$$

Equação 6

$$\sigma = \frac{M}{I_x} * y_2$$

Equação 7

Onde:

M é o valor numérico do Momento Fletor negativo, expresso em quilonewtons metro (kg.cm);

Ix é o Momento de Inércia (cm⁴);

Y₁ é a distância entre o topo do dormente e o centro de gravidade (cm);

Y₂ é distância entre a base do dormente e o centro de gravidade (cm).

Além disso, foi feito o cálculo da tensão de protensão, que será a força atuante para diminuir o Momento Fletor atuante no centro do dormente. Para essa análise foi utilizada a Equação 8.

$$\sigma_p = \frac{P_t}{A} \pm e * \frac{P_t}{I} * y_i$$

Equação 8

Onde:

P_t é Força de Protensão aplicada (kg);

A é a área da seção transversal do dormente (cm²);

e é a distância entre os centros de gravidade da área transversal do dormente e o de esforços de protensão (cm²);

I é o Momento de Inércia (cm⁴);

y_i é distância do centro de gravidade (cm).

No caso em estudo foi considerado uma protensão utilizando 4 feixes com 3 cabos do tipo CP 190, diâmetro de 6,5mm e protensão útil de 65%. Dessa forma, o valor de P_t é de 31980 Kg. Apresentando o dormente com a configuração apresentada na Figura 4.12.

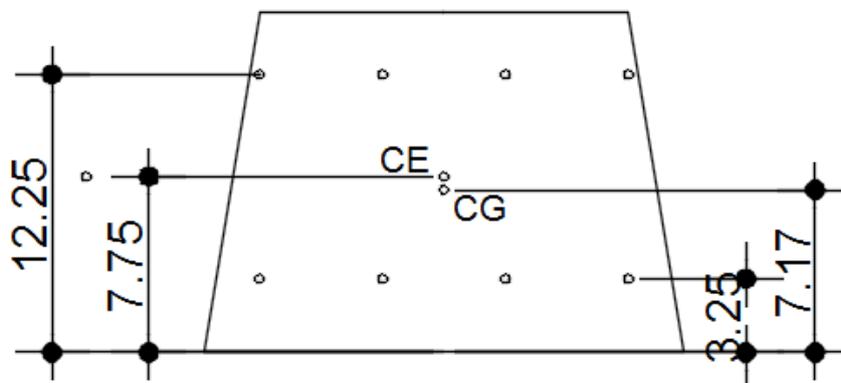


Figura 4.12- Dormente com Protensão
Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, é possível encontrar os valores das tensões acima citadas e comparar o valor da protensão entre as normas utilizando o mesmo dormente e a mesma quantidade de protensão. Tal comparação é observada na Tabela 4.24.

Tabela 4.24- Resultado Protensão

Comprimento (cm)		Arema			NBR11709		
		280	275	270	280 A/B	275 A/B	270 A/B
Momento (KN*m)	Negativo	-17,81	-18,22	-18,40	-21,75	-22,15	-22,54
Tensão Atuante (Kg/cm ²)	Superior	-268,53	-274,59	-277,35	-327,86	-333,85	-339,83
	Inferior	245,89	251,45	253,97	300,23	305,71	311,19
Tensão de Protensão (Kg/cm ²)	Superfície Superior	142,75	142,75	142,75	142,75	142,75	142,75
	Superfície Inferior	89,19	89,19	89,19	89,19	89,19	89,19
Tensão Real (Kg/cm ²)	Superior	-125,78	-131,84	-134,60	-185,11	-191,10	-197,08
	Inferior	335,08	340,63	343,15	389,41	394,89	400,37

Fonte: Elaborado pelo autor

Em análise última, é observado que em condições iguais de dimensionamento de dormente, que a norma brasileira por apresentar um comportamento mais conservador em relação ao Momento Fletor Negativo máximo apresenta resultado menos eficiente do que a norma americana. Para uma mesma quantidade de protensão o resultado apresenta uma diferença de mais de 30%. Isso significa que para chegar no mesmo resultado de protensão conseguido pela norma americana, seria necessário pelo menos 30% mais protensão para a norma brasileira.

5. CONCLUSÕES

Como visto nos capítulos anteriores, problemas ocorridos nos dormentes instalados nas vias ferroviárias ao longo do seu desenvolvimento neste século mostram que o projeto teórico de um dormente é complexo e, por isso, é feito com base na experiência prática adquirida, ou seja, o projeto é mais empírico do que teórico, como acompanhado pelo método da AREMA. Além disso, foi possível observar que existem diversos fatores que interferem no dimensionamento correto. Dessa forma, é muito difícil medir um carregamento que seja representativo do que realmente ocorre na via, visto que a carga do eixo da locomotiva é distribuída pelos dormentes mais próximos. Além disso é necessário considerar fatores como qualidade da construção, intempéries que o dormente irá suportar e conservação. Com isso, para se projetar um dormente é necessário analisar todo o conjunto de fatores atuantes sobre ele.

Nesse compasso, levando em consideração o parágrafo anterior e as pesquisas realizadas para concluir esse trabalho, é possível concluir que não existe um formato de dormente de concreto monobloco protendido já dimensionado de dormente, de acesso livre à pesquisa. Primeiramente porque essa informação tem um valor comercial muito alto. Porém nesse estudo foi dimensionado um dormente no qual pudesse ser estudado os esforços atuantes levando em consideração as duas normas em condições iguais.

No quesito de comparação entre normas, o primeiro fato interessante desse trabalho é concluir que para as características ferroviárias brasileiras e também norte americanas, os dormentes analisados pelo European Committee for Standardization (CEN) não tem empregabilidade, visto que apresenta um formato diferente do empregado com frequência no Brasil. Essa falta de utilidade, deve-se ao fato do CEN não apresentar carregamento no centro do dormente, fator fundamental para os dormentes de concreto monobloco protendidos. Isso ocorre devido às estruturas mais empregadas na Europa serem bibloco, no qual apresentam uma barra metálica no seu centro.

Conclui-se também, que a norma AREMA tende a um modelo mais empírico, apresentando uma série de ábacos e combinações para se chegar nos Momentos Fletores Positivos e Negativos. Desta forma, a diferença entre os Momentos Fletores reais e apresentados pela norma varia bastante podendo chegar a uma diferença de até 117% e em outras situações

apresentar valores inferiores aos Momentos Fletores reais. Com isso, para alguns casos a norma se apresenta muito conservadora e em outros com pouca margem de segurança.

Nesse passo, analisando apenas a norma americana é sugerido que o dimensionamento de dormentes de 280cm seja feito para carregamentos entre 16 e 32 toneladas por eixo; com dormentes de 275cm para carregamentos de 16 a 30 toneladas por eixo; para dormentes de 270cm o dimensionamento deve ser feito para carregamentos dentre 16 e 24 toneladas. Essa restrição se deve ao fato dos Momentos Fletores apresentados pela norma serem superiores aos Momentos Fletores reais, apresentando uma margem de segurança para seu dimensionamento.

Outra análise a ser feita em relação a AREMA é que para o mesmo carregamento a diferença numérica entre os Momentos Fletores Positivos e Negativos é grande. Tal fato não é o ideal para se dimensionar dormentes de concreto protendido de dimensões constantes.

Analisando a NBR 11709, foi possível concluir que essa norma pelo Método A é menos conservadora para Momentos Fletores Positivos em todos os carregamentos por eixo. Com isso, apresenta boa empregabilidade para uso em ferrovias que apresentam excelente manutenção e boa qualidade de lastro, visto que o aparecimento de Momentos Fletores excepcionais na região do Momentos Fletor Positivo será mais difícil. Porém caso não se tenha grande segurança sobre manutenção e qualidade do lastro se pode adotar o dimensionamento pelo Método B para uma maior segurança para a região dos Momentos Fletores Positivos.

Também se faz notar que a norma brasileira é mais racional, visto que os coeficientes e valores de Momentos Fletores foram encontrados por meio de fórmulas apresentadas pela norma. Dessa forma, comparando os Momentos Fletores reais com os apresentados pela norma apenas para o caso de dormente de 280cm e carregamento de 16 toneladas por eixo não se recomenda o dimensionamento usando a NBR11709.

Outro fator interessante da norma brasileira é que a segurança entre o valor dos Momentos Fletores calculados pela norma não varia de acordo com o carregamento, variando apenas em relação com comprimento do dormente. Por conseguinte, apresenta valores mais conservadores em relação aos Momentos Fletores Negativos para dormentes maiores, independente do carregamento por eixo.

No caso presente, foi feita a comparação entre a norma americana e a NBR 11709 no quesito protensão. Nessa análise se chegou a conclusão que pelo fato da AREMA não ter um viés tão conservador em relação aos Momentos Fletores Máximos comparado com a norma brasileira, sua protensão alcança maiores valores com a mesma quantidade de aço do que a NBR11709. Além disso, analisando os resultados se observou que para uma diferença de 10% entre os Momentos Fletores das duas normas, chegou-se a uma protensão superior em 17%. Por conseguinte, esse fato é importante para analisar e recomendar a forma de dimensionamento.

Em resumo, foram calculados todos os Momentos Fletores Reais, bem com os Momentos Fletores das normas, comparando-os em suas diferenças de esforços e analisado com os valores de protensão. Tomando como base os cálculos mencionados, foi elaborada a Tabela 5.1, diante da qual são apresentadas, na visão do autor, quais seriam as normas recomendadas para o dimensionamento mais vantajoso em relação aos quesitos estudados neste trabalho.

Tabela 5.1- Recomendações

Carga Eixo (KN)	Dormente de 280 cm	Dormente de 275 cm	Dormente de 270 cm
	Recomendação	Recomendação	Recomendação
160	AREMA	MÉTODO A	MÉTODO A
170	MÉTODO A	MÉTODO A	MÉTODO A
180	MÉTODO A	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA
190	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA
200	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA
210	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA
220	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA	MÉTODO A/ AREMA
230	MÉTODO A/ AREMA	AREMA	AREMA
240	AREMA	AREMA	AREMA
250	AREMA	AREMA	MÉTODO A
260	AREMA	AREMA	MÉTODO A
270	AREMA	AREMA	MÉTODO A
280	AREMA	AREMA	MÉTODO A
290	AREMA	AREMA	MÉTODO A
300	AREMA	AREMA	MÉTODO A
310	AREMA	MÉTODO A	MÉTODO A
320	AREMA	MÉTODO A	MÉTODO A

Fonte: Elaborado pelo autor

Por último, a realização desta pesquisa foi de suma importância para maior conhecimento do processo de dimensionamento de elementos de alto custo de implantação de ferrovias, além do alto valor comercial que o dormente apresenta. Ademais, esse trabalho teve grande importância

no aumento da visão holística para implementação de uma estrada de ferro, da importância de seus elementos e da interdependência de fatores para a análise do dimensionamento de um dormente monobloco de concreto protendido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT (2017). Agência Nacional de Transporte Terrestres. **Ferroviário**. Disponível em: <<http://appweb2.antt.gov.br/carga/ferroviario/ferroviario.asp>>. Acesso em: 03 jun. 2017.
- AREMA (2014). *American Railway Engineering and Maintenance-of Way Association. Manual for Railway Engineering*. Landover, Maryland: American Railway Engineering And Maintenance-of-way Association, 2014.
- ABNT (2015). Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11709: Dormentes de Concreto- Projeto, materiais e componentes**. Brasília, 2015. 137 p.
- ANTF (2017). Associação Nacional do Transportadores Ferroviários. **Informações gerais**. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>>. Acesso em: 24 jun. 2017.
- BASTOS, P. S. dos S. (1999). **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. São Carlos, 1999. 270 p.
- BRINA, H. L. (1979). **Estradas de ferro 1: Via Permanente**. Belo Horizonte, 1979. 259 p.
- BRINA, H. L. (1983). **Estradas de Ferro 2**. Rio de Janeiro, 1983.
- CEN (1996). *European Committee for Standardization. Railway Applications - Track - Concrete Sleepers and Bearers*. CEN, Part 1 - Common requirements. Brussels, 1996. 34p.
- CNT (2013). Confederação Nacional do Transporte. **O sistema ferroviário brasileiro**. Brasília, 2013. 58 p.
- DNIT (2015). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Procedimento Para Inspeção de Material, PIM**. Brasília, 2015. 44 p.
- DNIT (2015). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2015, Brasília. : **Dormente Monobloco de Concreto Protendido para Via Férrea**. Brasília, 2015. 50 p.
- DNIT (2015). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2015, Brasília **Procedimento Para Inspeção de Material, PIM: Trilho**. Brasília, 2015. 44 p.
- DNIT (2017). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- FRA (2013). *Federal Administration Railroad. Mechanistic Design of Concrete Crosstie and Fastening Systems*. Washington, 2013.
- NETO, C. B. (2012). **Manual didático de ferrovias**. Curitiba, 2012. 90 p.
- IPEA (2016). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Infraestrutura Econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas para 2025**. Bolívar Pêgo, 2016. 581 p.

PORTO, T. G. (2004). **Ferrovias: PTR- 2501**. São Paulo, 2004. 81 p.

RUMO ALL. (2016). **Programa de Exploração Ferroviária**. Curitiba, 2016.

SOARES, L. de S. (2006). **Procedimento Para Determinação da Velocidade Máxima Autorizada**. 2006. 181 f. Tese (Doutorado) - Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

TAYLOR, H. P. J. (1993). *The railway sleeper: 50 years of pretensioned, prestressed concrete*. *The Structural Engineer*, 1993. 288 p.

TOSHIMITSU, M.; KAINEN, W. (1980). **Linha férrea: gestão e projeto de via permanente**. Tóquio, 1980.

VENUTI, W. J. (1980). *The Status of Concrete Railroad Ties in North America*. IN: *Proceedings American Railway Engineering Association*, 1980.

WEBER, J. W. (1975). *Development of the Prestressed Concrete Tie in the USA*. IN: *Proceedings of a Symposium Railroad Track Mechanics and Technology*. Princeton, 1975.