

FABIO KARKLIS DINIZ  
MARTA ORMENO LAFUENTE  
MURILO MAYER PILS MACHADO  
RODRIGO LEONEL SARTORATO

## **ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DE TRENS E APLICAÇÕES**

Trabalho de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo.

São Paulo  
2012

FABIO KARKLIS DINIZ  
MARTA ORMENO LAFUENTE  
MURILO MAYER PILS MACHADO  
RODRIGO LEONEL SARTORATO

## **ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DOS TRENS E APLICAÇÕES**

Trabalho de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo.

Área de concentração: Departamento  
de topografia e transporte da  
engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Telmo Giolito

São Paulo  
2012

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Diniz, Fábio Karklis**

**Estudo da resistência ao movimento de trens e aplicações /  
F.K. Diniz, M. Ormeño Lafuente, M.M.P. Machado, R.L. Sartorato.  
-- São Paulo, 2013.  
62 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transporte.**

**1.Trens (Resistência) I. Ormeño Lafuente II.Machado, Murilo  
Mayer Pils III.Sartorato, Rodrigo Leonel IV.Universidade de São  
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de  
Transporte V.t.**

## AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais e irmãos pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em nós desde o início da faculdade, que sempre estiveram ao nosso lado nos ajudando a enfrentar os desafios que a vida nos impõe.

Aos amigos que sempre nos incentivaram e tiveram muita paciência durante os momentos difíceis dessa jornada.

Ao engenheiro Sergio Uchoa, da Tejofran, que esteve disposto a nos ajudar, tirar dúvidas e fornecer dados.

Ao engenheiro Rodrigo Marques Pereira, da CAF Brasil, que esteve disposto a nos atender e fornecer dados.

Por fim ao Prof. Telmo Giolito, da Escola Politécnica, que nos orientou nesse trabalho, e agradecemos especialmente pela sua atenção e seu suporte.

## **RESUMO**

O trabalho busca uma melhor compreensão do que são as resistências de rolamento, do atrito e do vento, ou seja, das resistências normais, que se opõem ao movimento das composições ferroviárias. Assim, primeiramente abordamos o tema por meio de pesquisa bibliográfica para identificar como o assunto é tratado, como é determinada a resistência, e que parâmetros influenciam no seu cálculo. Posteriormente há a análise das metodologias de cálculo da resistência ao movimento dos trens e, a partir daí, o objetivo passa ser o entendimento de como a metodologia mais usual, a da inércia, se aplica na prática, por meio do estudo de um exemplo prático e um estudo de caso com estimativa das resistências a partir de ensaios de campo.

Palavras-Chave: Resistência; Trem;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução histórica da malha ferroviária brasileira .....	10
Figura 2 - Plano de desenvolvimento dos transportes brasileiros do PNL T .....	11
Figura 3 - Base rígida da locomotiva .....	14
Figura 4 - Plotagem dos valores de A em função das cargas em locomotivas .....	21
Figura 5 - Plotagem dos valores de A em função das cargas em vagões .....	22
Figura 6 - Verificação de C em função da carga para locomotivas. ....	24
Figura 7 - Determinação de C em função da carga nos vagões. ....	25
Figura 8 - Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva .....	26
Figura 9 - Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva .....	27
Figura 10 - Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva para 60 Km/h.....	28
Figura 11 Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva para 80 Km/h .....	29
Figura 12 - Plotagem dos resultados obtidos .....	30
Figura 13 - Resistência normal em função da velocidade.....	31
Figura 14 - Plotagem de resistência Vagão Hopper Aberto .....	35
Figura 15 - Características do trem TUE CAF Série-7000 .....	36
Figura 16 - Velocidade x Distância percorrida.....	41
Figura 17 - Variação das parcelas da resistência com a velocidade.....	41
Figura 18 - Variação do coeficiente A obtido.....	52
Figura 19 - Variação do coeficiente B em função do número de eixos .....	52
Figura 20 - Variação do B em função do tamanho do trem testado. ....	53
Figura 21 - Gráfico com valores de $Cv^2$ em função do tamanho do trem .....	54
Figura 22 - Planilha de simulação, trecho reto .....	56
Figura 23 - Planilha de simulação, trecho com todos os tipos de resistências. ....	56
Figura 24 - Trens utilizados no exemplo de aplicação .....	61
Figura 25 - Teste recebido da CAF .....	61
Figura 26 - Teste 2- CAF.....	62
Figura 27 - Teste 3 - CAF .....	62

## LISTA DE TABELAS

- Formulação para resistência obtida do livro Estradas de Ferro.....	17
- Formulação obtida a partir do livro Tratado de Estradas de Ferro.....	17
- Formulação obtida da empresa Alsthom.....	18
- Formulação da ABA (Air Brake Association).....	18
- Formulação Tração Elétrica.....	18
- Legenda para formulações.....	18
- Coeficiente A em função da carga vertical.....	20
- Variação do A em função da carga em vagões.....	22
- Valores de B em locomotivas.....	23
- Valores de B em vagões.....	23
- Valores de C para locomotivas.....	24
- C em vagões.....	25
- Resistência normal total para variação da carga, V= 20Km/h.....	26
- Resistência Normal Total para variação da carga, V = 40 KM/h.....	27
- Resistência Normal Total para variação da carga, V = 60 KM/h.....	28
- Resistência Normal Total para variação da carga, V = 80 KM/h.....	29
- Resultados de formulações de resistência normal para vagões.....	30
- Resultados para resistência normal.....	31
- Resistência normal devido a A.....	32
- Resistência normal devido a B.....	32
- Resistência Normal devido a C.....	32
- Resistência em VHA.....	33
- Res Normal devido a A (VHA).....	33
- Resistência Normal devido B (Vagão Hopper Aberto).....	34
- Resistência Normal devido a C (VHA).....	34
- Início do modelo de parada do trem.....	38
- Final da tabela do modelo.....	40
- Tabela com resistências normal e de rampa.....	43
- Final do modelo de simulação.....	44
- Condições atmosféricas do teste realizado.....	49
- Condições de pista.....	49
- Resultados obtidos.....	50

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	9
2	OBJETIVOS .....	9
2.1	Objetivos Gerais .....	9
2.2	Objetivos Específicos.....	9
3	Justificativa .....	10
4	METODOLOGIA.....	12
5	Revisão Bibliográfica .....	12
6	Coeficientes de Davis em unidades atuais .....	16
7	Análise comparativa dos coeficientes das fontes citadas .....	19
7.1	Locomotivas e Vagões Utilizados para dimensionamento .....	19
7.2	Variação de A em função da carga vertical .....	20
7.3	Variação de B em função da carga vertical .....	23
7.4	Variação de C em função da carga vertical .....	24
7.5	Variação da Resistência Normal em função da carga vertical .....	25
7.5.1	Locomotiva .....	26
7.5.2	Vagão.....	30
7.6	Variação da Resistência normal em função da velocidade.....	31
7.6.1	Locomotiva G.E. Modelo C44-9WM .....	31
7.6.2	Vagão Hopper Aberto.....	33
8	Análise da dimensão das resistências .....	35
9	Métodos utilizados para determinação da resistência .....	45
10	Aplicações:.....	46
10.1	Exemplo de Aplicação de medição de resistência ao movimento: .....	47
10.2	Exemplo de Aplicação em projeto de Metrô: .....	54
10.3	Aplicações típicas das expressões para a resistência normal em termos de Engenharia Ferroviária: .....	57
11	CONCLUSÕES PRELIMINARES.....	58
12	Bibliografia .....	60



## **1 INTRODUÇÃO**

Conforme explicitado no próprio tema, Estudo da Resistência ao Movimento de Trens e Aplicações, o trabalho trata das resistências presentes no movimento das composições ferroviárias, abordando as mesmas em dois grupos: resistências acidentais e resistências normais.

As resistências acidentais apresentam formulação teórica (exceto a de curva), já estão consolidadas e foram apenas citadas no relatório. Por outro lado, as resistências normais, têm formulação empírica, que depende das características de cada trem, assim, enfatizamos o estudo das resistências normais. Partimos inicialmente de uma revisão bibliográfica, com pesquisa e atualização das fórmulas para unidades e condições atuais. Em seguida, foi feita a análise das fórmulas e seus coeficientes, mostrando como os mesmos variam em função da carga e velocidade. Existe também um exemplo do procedimento necessário para obter os coeficientes da formulação proposta por Davis. O grupo buscou, com a ajuda de engenheiros da Alstom, CAF, Tejofran e CPTM, um ensaio que fizesse possível a obtenção dos coeficientes de Davis, de forma semelhante à feita no exemplo, porém, devido aos diversos fatores como segredos comerciais, custos de realizar um ensaio particular, cláusulas contratuais e afins, não foi possível atingir o objetivo.

Por fim, foram apresentadas algumas das possíveis aplicações práticas da estimativa das resistências e um exemplo prático do uso das fórmulas de resistência. Assim, com aplicações como a possibilidade de prever o consumo de energia, dimensionamento da rede elétrica etc., encerramos o trabalho deixando clara a grande relevância do tema.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O trabalho objetiva o estudo dos parâmetros de resistência ao movimento dos trens, baseando-se na bibliografia disponível sobre o tema, com a finalidade de confecção de roteiro que disponha e compare as diversas abordagens existentes. Após a pesquisa e estudo das fórmulas segue para a atualização dos coeficientes de cálculo, baseando-se nas composições ferroviárias atuais, a partir de dados fornecidos por empresas do ramo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Também há o estudo das possíveis aplicações das formulas estudadas. Assim o estudo complementa a revisão de fórmulas no sentido de possibilitar a verificação de como elas são usadas em uma situação real e qual sua importância. Outra possibilidade também seria, a partir de ensaios, obter os coeficientes das fórmulas de Davis.

### 3 JUSTIFICATIVA

O Brasil encontra-se em um momento favorável ao setor ferroviário. Em 2007, o governo lançou o Plano Nacional de Logística e Transporte, que previa, já para 2015 a participação de 32% das ferrovias no transporte total de cargas brasileiro. Atualmente muitos dos projetos estão em andamento, porém o PNLT de 2007 apresentou muitos problemas, principalmente de gestão, com obras fora do prazo e problemas em licitações. Assim, mesmo com a adoção de algumas alterações, que foram constantes durante o seu desenvolvimento, o plano teve de ser substituído.

Em agosto de 2012, foi criada uma nova versão do PNLT, que visa ajudar o país a dotar de um sistema de transporte adequado. O plano prevê grandes investimentos, de 91 bilhões de reais no total em ferrovias, sendo que 56 bilhões devem ser investidos nos próximos 5 anos e o restante em até 25 anos. Isso deve incluir à malha brasileira cerca de 10.000 km de trilhos.

Para se entender a situação atual das ferrovias no país, é fundamental olhar para o histórico do sistema ferroviário brasileiro, para que se tenha uma visão contextualizada.

A história das estradas de ferro no Brasil começou a se desenvolver a partir da década de 1830, a grande expansão do setor ocorreu entre o final do século XIX até a primeira metade do século XX, onde sofreu com a falta de investimentos, tendo uma perda total de cerca de 10.000 km de trilhos. Essa situação pode ser vista na figura 1, a seguir:

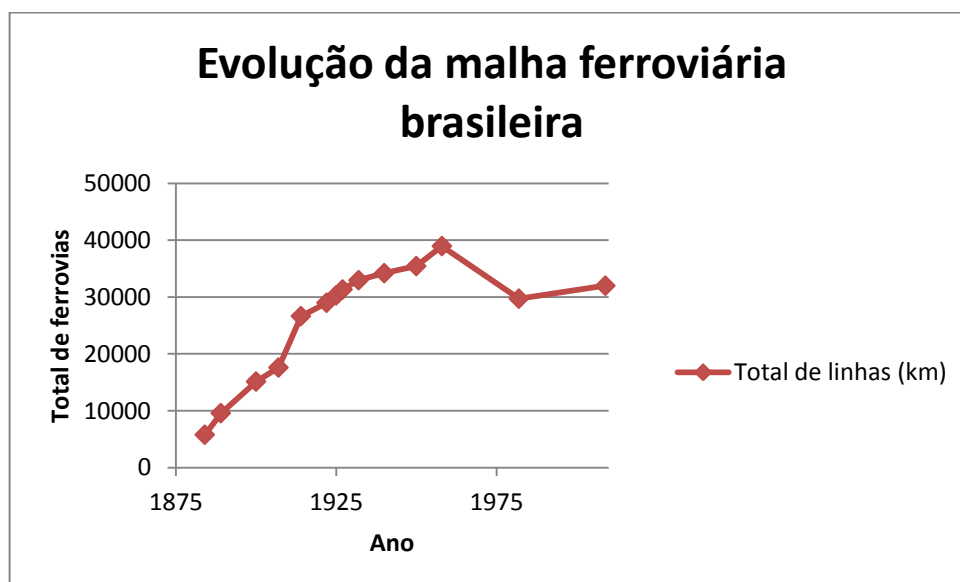


Figura 1 - Evolução histórica da malha ferroviária brasileira

Muitos dos trechos que estavam programados para serem trabalhados no PNLT já existem, mas estão sucateados devido à falta de uso, e por

consequência, falta de manutenção. O plano está detalhado na figura 3.



**Figura 2 - Plano de desenvolvimento dos transportes brasileiros do PNLT**

Observamos que existe uma correlação entre os investimentos no setor ferroviário e os feitos nas pesquisas do mesmo. Assim, no Brasil os estudos científicos da área foram marginalizados e em geral estão restritos a empresas do ramo. Por esse motivo, constata-se a existência de poucas bibliografias, nacionais e atualizadas, sobre os diversos temas ligados ao transporte ferroviário.

O trabalho tratará de um dos temas desatualizados, que é o estudo das resistências ao movimento dos trens. Abordando em especial, as resistências normais, que são as que se opõem ao movimento da composição, e que existem independentemente do relevo e do traçado da via.

A partir do cálculo das resistências podemos tratar de uma questão estratégica, para o setor de transporte, que é o consumo energético nesse modal de transporte. Essa informação tem grande relevância, na comparação com outros modais, durante o processo de planejamento de investimentos e, no caso de composições elétricas, para o dimensionamento da rede de abastecimento, que tem cada vez mais importância.

Como outros pontos em que o tema é importante podemos citar cálculo das distâncias de frenagem e os projetos de sinalização, para os quais ele é um parâmetro básico.

Existem também alguns processos de licitação nos quais a estimativa do consumo das composições é exigida, com cláusulas punitivas que repassam os custos, caso o consumo seja superior ao estipulado, para a empresa responsável.

Atualmente temos pouca bibliografia disponível sobre o tema, e a obtenção desses parâmetros é feita por meio de fórmulas particulares de cada empresa, e que geralmente já estão inclusas em um programa de cálculo geral da ferrovia, o que gera uma dificuldade em obter a fórmula. Nessas formulas são observados muitos erros e, no geral, elas aplicam-se a casos muito específicos. A bibliografia existente, no geral, está desatualizada, com formulações definidas para locomotivas antigas e com cargas muito inferiores as da realidade atual.

Pelos motivos expostos acima, O Estudo das Resistências ao Movimento dos Trens e Aplicações foi escolhido como tema do trabalho.

#### **4 METODOLOGIA**

As atividades serão realizadas por meio da abordagem da aplicação das fórmulas que retratam as resistências ao movimento das composições ferroviárias. Porém, como as resistências acidentais já são bem definidas, o trabalho será focado nas resistências normais.

O estudo das resistências normais inicia-se com pesquisa prévia sobre o material existente visando o domínio dos conceitos. A partir daí prossegue análise comparativa, e atualização, entre a situação abordada na bibliografia e a atual, essa comparação será feita a partir de dados fornecidos por empresas do setor ferroviário e entrevistas com profissionais da área para composição de “know how” do assunto.

Outra preocupação do grupo é como se dá a aplicação prática do tema, assim, para consolidar os resultados e justificar os trabalhos, buscaremos enunciar algumas das aplicações mais usuais e relevantes. Também será realizado o estudo de caso de uma situação específica em que serão utilizados modelos matemáticos para obter fatores como distância de frenagem das composições e/ou modelagem da alimentação elétrica dos trens.

#### **5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O livro Estradas de Ferro [1] define resistência de trem como sendo “o conjunto de forças que se opõe ao movimento dos veículos ferroviários, ou rebocados, quando se deslocam sobre via férrea”, sendo que essa resistência é considerada no contato entre rodas e os trilhos, de forma oposta ao movimento trator nas rodas da locomotiva.

Nas bibliografias existentes, essa resistência é calculada na forma unitária,  $R'$  e é definida em kg/t, ou seja, a resistência em quilograma-força por tonelada da locomotiva ou vagão. Para o cálculo da resistência total da composição, adota-se  $R$ , que seria a resistência unitária vezes a massa em toneladas da composição.

Existe uma classificação das resistências, na qual elas são divididas de acordo com o tipo do veículo em que atuam (veículo trator ou rebocado), e se elas existem desde o início do movimento (normais), ou em circunstâncias especiais (acidentais). A seguir apresentaremos a divisão, presente em [1], proposta pelo Prof. Sampaio Correia.

#### Resistências dos Veículos Rebocados:

##### Resistências Normais

- De Atrito
  - (A) nas mangas dos eixos;
  - (B) nos cubos das rodas;
  - (C) nos frisos das rodas.
- De gravidade
  - (D) Devido ao rolamento (depressão da linha)
- Do meio
  - (E) Pela pressão frontal;
  - (F) Pelo atrito superficial (nas partes laterais e superiores);
  - (G) Pelo turbilhonamento sob o veículo;
  - (H) Pela sucção, na parte traseira;
  - (I) Pelas correntes atmosféricas;

##### Resistências Acidentais

- De inércia
  - (J) No início do movimento (para adquirir velocidade);
  - (K) Para aumentar a velocidade (acelerar).
- De atrito (curvas)
  - (L) Escorregamento dos aros das rodas sobre os trilhos;
  - (M) Escorregamento dos frisos das rodas sobre os trilhos.
- De gravidade (rampa)
  - (N) Elevação do centro de gravidade dos veículos ao subir as rampas.

#### Resistências dos veículos Tratores

Resistências Comuns, Idênticas aos dos veículos rebocados.

Resistências Especiais, Próprias dos trabalhos dos mecanismos.

No trabalho enfatizaremos o estudo das resistências definidas anteriormente como resistências normais, uma vez o calculo das resistências acidentais apresenta metodologias consolidadas, podendo ser tratadas analiticamente de forma precisa.

Para melhor compreensão da resistência normal é necessário fazer uma comparação com as outras resistências, verificação de quais são mais importantes, além das fórmulas de cálculo.

Formulas de resistências acidentais:

A resistência de curva, assim como a resistência normal é calculada experimentalmente, porém na bibliografia foi encontrada apenas uma fórmula relativa a isso, ou seja, nos diversos livros as duas fórmulas eram idênticas, o que sugere que as fórmulas já estejam suficientemente ajustadas.

- Locomotiva: \_\_\_\_\_
- Vagão: \_\_\_\_\_

Onde:

- $p$  = base rígida da locomotiva.
- $R$  = Raio de curvatura em metros.
- $R'$  = Taxa de resistência em Kg/t.
- $B$  = bitola da linha.

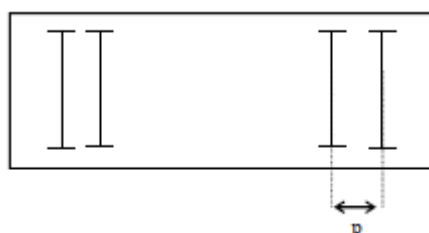


Figura 3 - Base rígida da locomotiva

A resistência de rampa é calculada teoricamente, segundo a seguinte fórmula:

— .

Com —

Resistências de inércia e de aceleração também são calculadas teoricamente, segundo as seguintes fórmulas:

- Início de movimento: —
- Aceleração: —

Sendo:

- $V$  = Velocidade a ser adquirida
- $L$  = Distância a ser percorrida para obtenção de velocidade.
- $V_f$  = Velocidade ao final da aceleração.
- $V_i$  = Velocidade no início da aceleração.

As variáveis que compõem a resistência normal dos veículos apresentam, na sua maioria, uma infinidade de fatores a considerar, e seu cálculo analítico torna-se muito trabalhoso e complexo. Para calcular a resistência de atrito, por exemplo, teríamos de analisar todas as peças, que participam do rolamento, e cargas a que estas estão sujeitas, para assim estimar as forças resistivas oriundas de tal atrito.

Salientamos que em outros trabalhos, como por exemplo em Ferrocarriles [2], as resistências normais são citadas apenas pelo nome de resistência ao rolamento.

Como forma de obter essas resistências, Davis [3] propôs em seus estudos o uso de uma equação com que relaciona algumas variáveis e a velocidade da composição férrea:

Uma característica importante é que a resistência é resultante da composição entre a resistência mecânica ( ) e a resistência do vento ( ). Assim, a fórmula pode também ser apresentada no seguinte formato:

Na equação, o termo “a” corresponde principalmente ao atrito do rolamento, variando somente em função do peso por eixo. O termo “b” está relacionado com o atrito do friso com o trilho. E por fim o termo “c” relaciona-se a resistência do ar e leva em consideração a área frontal do veículo.

É importante salientar que foi proposta uma fórmula para cada tipo de veículo da composição férrea, pois, existem composições de locomotivas e vagões diversos.

Atualmente, os estudos sobre o tema são feitos com base nas formulas propostas por Davis, determinando tais coeficientes de forma experimental. Pois, como foi citado anteriormente, é muito trabalhosa uma abordagem analítica das parcelas que compõem essa resistência.

Neste trabalho serão exibidas as fórmulas propostas de Davis que se aplicam para locomotivas elétricas, diesel-elétricas, carros de passageiros, vagões, carros motores e trens-unidades. Porém, os coeficientes originais das primeiras fórmulas não são confiáveis quando aplicados a trens de alta velocidade ou outros tipos de trens especiais que não existiam na época da sua determinação. Também, devido as mudanças nos trens, principalmente as relativas à capacidade de carga, as formulas de Davis foram modificadas por diversos órgãos respeitados ao redor do mundo como o Canadian National Railroads, e o Eire –Lackawanna Railroads.

## **6 COEFICIENTES DE DAVIS EM UNIDADES ATUAIS**

A seguir serão apresentadas as formulas de resistência ao movimento das diversas bibliografias, já com os seus valores em unidades atualizadas. (Em alguns dos materiais pesquisados, as fórmulas apresentavam unidades como libras e pés quadrados).

As fórmulas foram feitas para bitolas de 1,435 metros, porém no Brasil são aplicadas para bitolas de 1,00 e 1,6 metros, porém as mudanças são muito pequenas.

Estradas de Ferro [1] (baseadas nos trabalhos de Davis):



**Tabela 1 - Formulação para resistência obtida do livro Estradas de Ferro.**

Veículo	Carga por Eixo	Fórmula
Locomotiva	Superior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
	Inferior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5} - 0.1$
Vagões	Superior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
	Inferior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5} - 0.1$
Carros de Passageiros	Superior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
	Inferior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5} - 0.1$
Trem Unidade Carro de Frente	Superior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
	Inferior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5} - 0.1$
Trem Unidade Carro Rebocado	Superior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
	Inferior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5} - 0.1$
Trem Unidade Carro Motor	Superior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
	Inferior a 4.5 toneladas	$R'_n = \frac{W}{4.5} - 0.1$

Tratado de estradas de ferro[4]:

**Tabela 2 - Formulação obtida a partir do livro Tratado de Estradas de Ferro**

Veículo	Fórmula
Vagões	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
Vagões ABA (Air-Brake Association)	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
Locomotiva Comandante (Davis 1926)	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
Locomotiva Comandada	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
Trem Unidade elétrico-Carro líder	$R'_n = \frac{W}{4.5}$
Trem Unidade elétrico-Carro comandado	$R'_n = \frac{W}{4.5}$

Tração elétrica [5]:

ALSTHOM:

**Tabela 3 - Formulação obtida da empresa Alsthom**

Veículo	Fórmula
Locomotiva	$R'_n = \frac{W}{V}$
	Valores de k
Trens de cargas medianamente carregados	2000
Trens de passageiros	2500
Trens de cargas especializados	4400

**Tabela 4 - Formulação da ABA (Air Brake Association)**

Veículo	Fórmula
Vagões	$R'_n = \frac{W}{V}$

**Tabela 5 – Formulação Livro Tração Elétrica**

Veículo	Fórmula
Vagão	$R'_n = \frac{W}{V}$
carro com truques	$R'_n = \frac{W}{V}$
vagão com truques	$R'_n = \frac{W}{V}$

Sendo:

**Tabela 6 - Legenda para formulações.**

<b>R'n</b>	Taxa de resistência em kg/t;
<b>A</b>	Área frontal em m <sup>2</sup> ;
<b>V</b>	Velocidade em km/h;
<b>N</b>	Número de eixos por veículo;
<b>W</b>	Peso médio por eixo em tonelada;

## 7 ANÁLISE COMPARATIVA DOS COEFICIENTES DAS FONTES CITADAS

A partir das fórmulas previamente apresentadas, podemos fazer gráficos mostrando a variação de cada termo em função da carga vertical aplicada. Para isso, adotou-se composições de área frontal de  $15\text{m}^2$ , que é um valor aproximado obtido de especialistas.

### 7.1 Locomotivas e Vagões Utilizados para dimensionamento

#### 7.1.1 Locomotiva:

Fabricante:	ALCO - G.E.
Modelo:	RSD-8
Peso:	68.100kg
Peso por Eixo:	11.350kg
Número de Eixos:	6



Fabricante:	G.E.
Modelo:	C44-9WM
Peso:	183.000 kg
Peso por Eixo:	30.500 kg
Número de Eixos:	6
Dimensões:	
Largura	3,12 metros
Altura:	5,03 metros



Fonte: Livro A Ferrovia de Minas, Rio e São Paulo

<http://vfco.brazilia.jor.br/locomotivas/Fepasa/20-locomotiva-Alco-RSD8-1m00-3501-desenho.shtml>

Os dois modelos de locomotivas apresentados são exemplos de extremos, em termo de tamanho, das locomotivas utilizadas no país. O modelo C44-9WM é utilizado nas ferrovias de minério da companhia Vale do Rio Doce, o outro modelo é uma locomotiva da década de 50, atualmente considerada como de pequeno porte. Assim, usaremos valores de 60 até 180 toneladas na análise das fórmulas obtidas na bibliografia.

Como área frontal, usaremos valores de  $15\text{ m}^2$ .

### 7.1.2 Vagões:

Modelo:	Hopper Aberto HAT
Peso Bruto Máximo:	100.000 kg
Tara:	22.000 kg
Número de Eixos:	4
Capacidade Volumétrica:	30 m <sup>3</sup>



Modelo:	Hopper Fechado HF
Peso Bruto Máximo:	130.000 kg
Tara:	31.000 kg
Número de Eixos:	4
Capacidade Volumétrica:	145 m <sup>3</sup>



Fonte: Ferrolease.

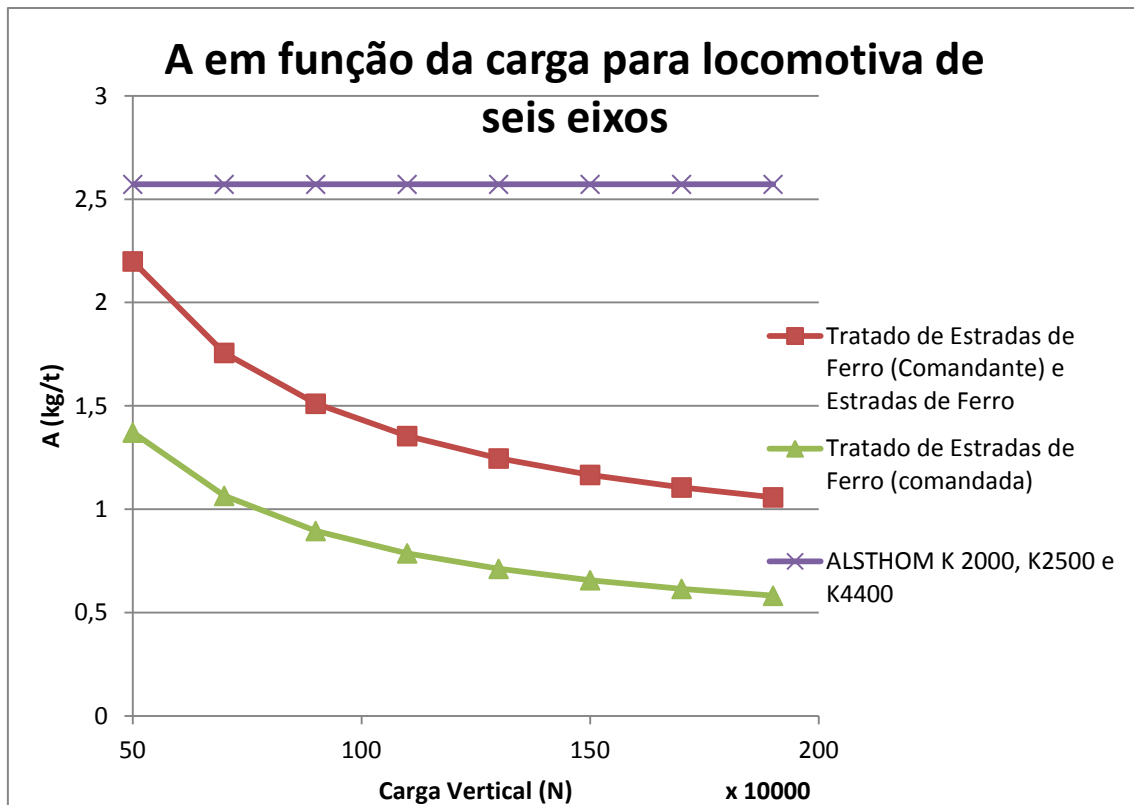
Partindo dos dois modelos extremos, entre os usuais no país, pode-se observar que, vazios, o mínimo que um vagão tem é cerca de 20 toneladas, e pode chegar a 130 toneladas se for completamente carregado.

## 7.2 Variação de A em função da carga vertical

### 7.2.1 Locomotiva:

Tabela 7 - Coeficiente A em função da carga vertical

Cargas total (N)	Ton/ Eixo	Estr. de Ferro	Locomotiva comandante (Tratado E. Ferro)	Locomotiva comandada (Tratado E. Ferro)	ALSTOM K 2000	ALSTOM K 2500	ALSTOM K 4400
500.000	8,49	2,20	2,20	1,37	2,57	2,56	2,53
700.000	11,89	1,76	1,76	1,07	2,57	2,56	2,53
900.000	15,29	1,51	1,51	0,90	2,57	2,56	2,53
1.100.000	18,69	1,36	1,35	0,79	2,57	2,56	2,53
1.300.000	22,09	1,25	1,25	0,71	2,57	2,56	2,53
1.500.000	25,48	1,17	1,17	0,66	2,57	2,56	2,53
1.700.000	28,88	1,11	1,11	0,62	2,57	2,56	2,53
1.900.000	32,28	1,06	1,06	0,58	2,57	2,56	2,53



**Figura 4 - Plotagem dos valores de A em função das cargas em locomotivas**

Observamos que há convergência nos resultados das formulas apresentadas no estrada de ferro (comandante e comandada). E também é possível estimar a carga por eixo para qual as formulas da ALSTOM foram feitas.

### 7.2.2 Vagão

Tabela 8 - Variação do A em função da carga em vagões.

Carga total (N)	Ton/eixo	Estrada de ferro	Tratado de estradas de ferro 1	Tratado de estradas de ferro 2	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
200.000	5,10	3,24	7,10	2,09	3,24
350.000	8,92	2,13	4,34	1,32	2,13
500.000	12,74	1,70	3,23	1,01	1,69
650.000	16,56	1,44	2,63	0,85	1,45
800.000	20,39	1,27	2,26	0,75	1,30
950.000	24,21	1,14	2,01	0,68	1,20
1.100.000	28,03	1,04	1,82	0,62	1,12
1.250.000	31,86	0,97	1,68	0,59	1,06
1.400.000	35,68	0,91	1,57	0,56	1,02

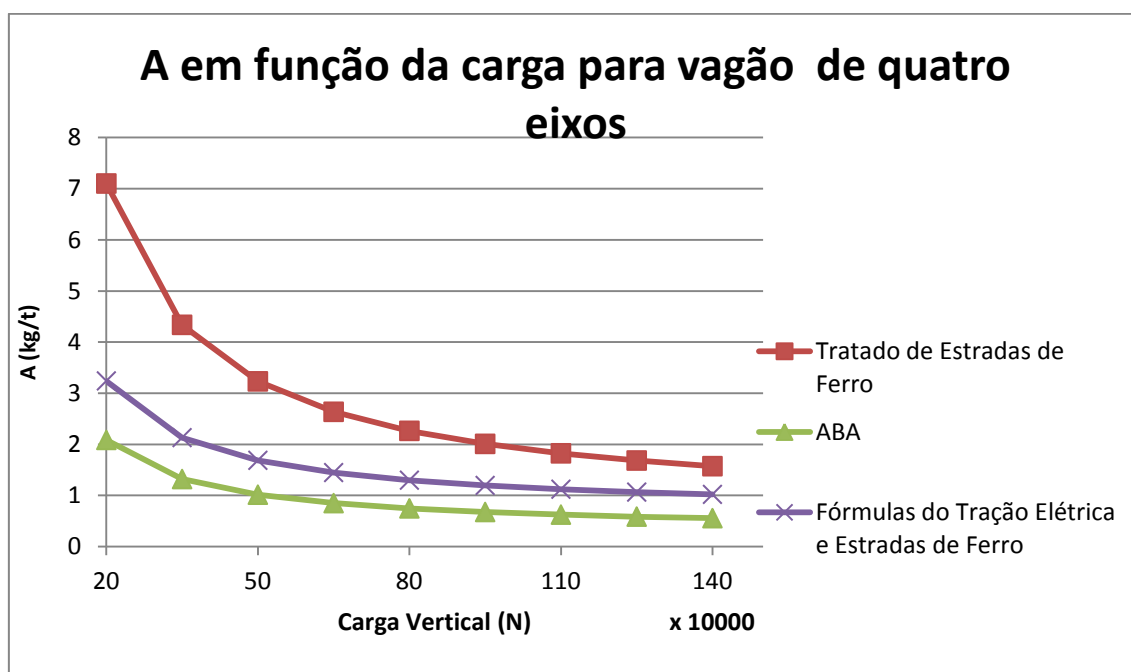


Figura 5 - Plotagem dos valores de A em função das cargas em vagões

Observamos que há convergência nos resultados para valores de carga suficientemente altos, que representam as cargas utilizadas na maior parte do tempo, já que vagões costumam andar carregados.

## 7.3 Variação de B

### 7.3.1 Locomotiva

Tabela 9 – Valores de B em locomotivas

	Estradas de ferro	locomotiva comandante (tratado de estradas de ferro)	locomotiva comandada (tratado de estradas de ferro)	ALSTHOM mediamente carregado	ALSTHOM passageiros	ALSTHOM carga especializados
Valor de B	0,009	0,00938	0,00938	0,012	0,0096	0,005455

### 7.3.2 Vagão

Tabela 10 - Valores de B em vagões.

	Estrada de ferro	tratado de estradas de ferro 1	tratado de estradas de ferro 2	Tração elétrica formulas usadas no Brasil
Valor de B	0,014	0,005	0,003	0,00931

## 7.4 Variação de C em função da carga vertical

### 7.4.1 Locomotiva

Tabela 11 - Valores de C para locomotivas

Cargas total (N)	Ton/eixo	Estradas de Ferro	locomotiva comandante (tratado de estradas de ferro)	locomotiva comandada (tratado de estradas de ferro)	ALSTHOM medianamente carregado	ALSTHOM passageiros	ALSTHOM cargas especializadas
500.000	8,494	0,0013	0,0014	0,0003	0,0005	0,0004	0,0002
700.000	11,892	0,0009	0,0010	0,0002	0,0005	0,0004	0,0002
900.000	15,290	0,0007	0,0008	0,0002	0,0005	0,0004	0,0002
1.100.000	18,688	0,0006	0,0006	0,0002	0,0005	0,0004	0,0002
1.300.000	22,086	0,0005	0,0005	0,0001	0,0005	0,0004	0,0002
1.500.000	25,484	0,0004	0,0005	0,0001	0,0005	0,0004	0,0002
1.700.000	28,882	0,0004	0,0004	0,0001	0,0005	0,0004	0,0002
1.900.000	32,280	0,0003	0,0004	0,0001	0,0005	0,0004	0,0002

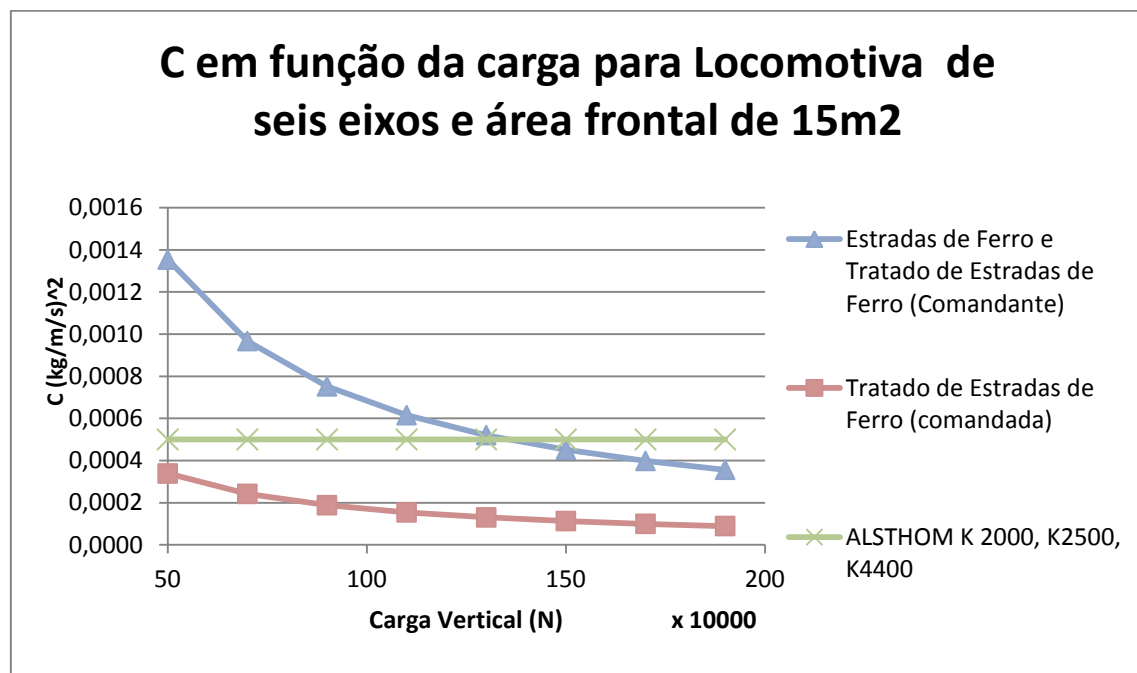


Figura 6 - Verificação de C em função da carga para locomotivas.

Observamos que há convergência nos resultados e também é possível estimar a carga por eixo para qual as fórmulas da ALSTOM foram feitas.



## 7.4.2 Vagão

Tabela 12 - C em vagões.

Carga total (N)	Ton/eixo	Estradas de Ferro	Tratado de Estradas de Ferro 1	Tratado de Estradas de Ferro 2	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
200.000	5,09	0,0007	0,0007	0,0009	0,0001
350.000	8,91	0,0004	0,0004	0,0005	0,0001
500.000	12,74	0,0003	0,0003	0,0004	0,0001
650.000	16,56	0,0002	0,0002	0,0003	0,00005
800.000	20,38	0,0002	0,0002	0,0002	0,00004
950.000	24,21	0,0001	0,0002	0,0002	0,00003
1.100.000	28,03	0,0001	0,0001	0,0002	0,00003
1.250.000	31,85	0,0001	0,0001	0,0001	0,00002
1.400.000	35,67	0,0001	0,0001	0,0001	0,00002

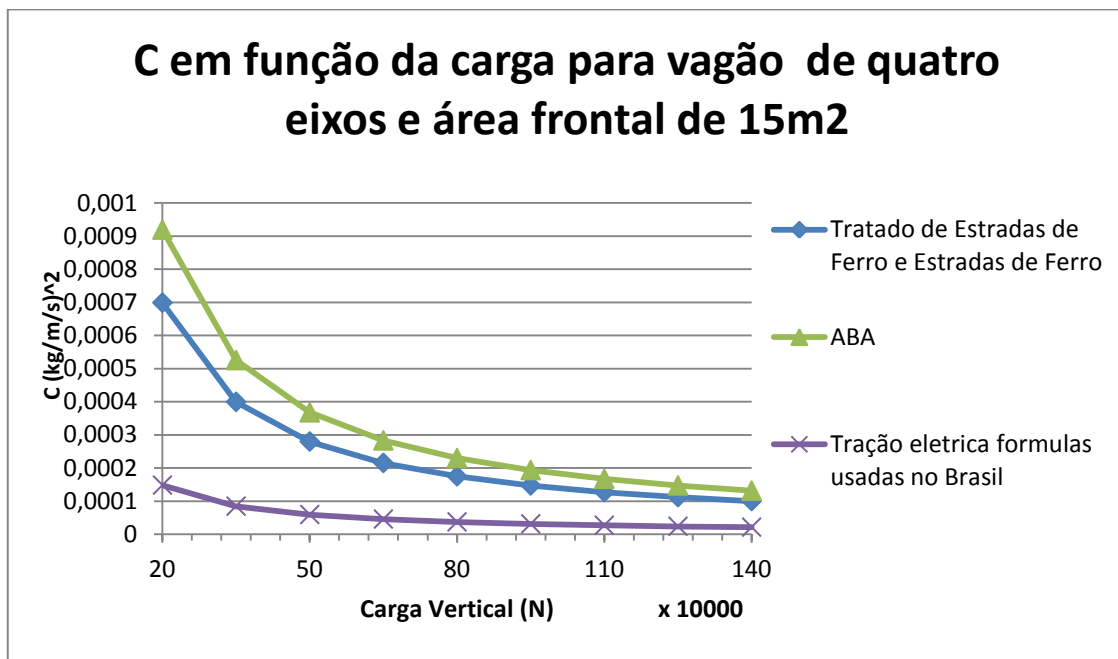


Figura 7 - Determinação de C em função da carga nos vagões.

Observamos que há convergência nos resultados para valores mais altos de carga.

## 7.5 Variação da Resistência Normal em função da carga vertical para cada velocidade

### 7.5.1 Locomotiva

Uma análise foi feita, para diferentes velocidades foi variada a carga vertical. As velocidades escolhidas foram de 20, 40, 60 e 80 km/h (velocidades usuais para trens de carga).

Tabela 13 - Resistência normal total para variação da carga, V= 20Km/h

V(km/h)	20	Resistencia Normal Total (kN)					
Carga total (kN)	Ton/eixo	Estradas de ferro	Tratado de Estradas de Ferro (comandante)	Tratado de Estradas de Ferro (comandada)	ALSTHO M K 2000	ALSTHOM K 2500	ALSTHO M K 4400
500	8,49	2,25	2,28	1,05	1,81	1,69	1,50
700	11,89	2,42	2,44	1,15	2,53	2,37	2,10
900	15,29	2,58	2,61	1,25	3,25	3,05	2,70
1100	18,69	2,75	2,78	1,34	3,97	3,73	3,31
1300	22,09	2,91	2,95	1,44	4,70	4,41	3,91
1500	25,48	3,08	3,11	1,54	5,42	5,08	4,51
1700	28,88	3,25	3,28	1,64	6,14	5,76	5,11
1900	32,28	3,41	3,45	1,73	6,86	6,44	5,71

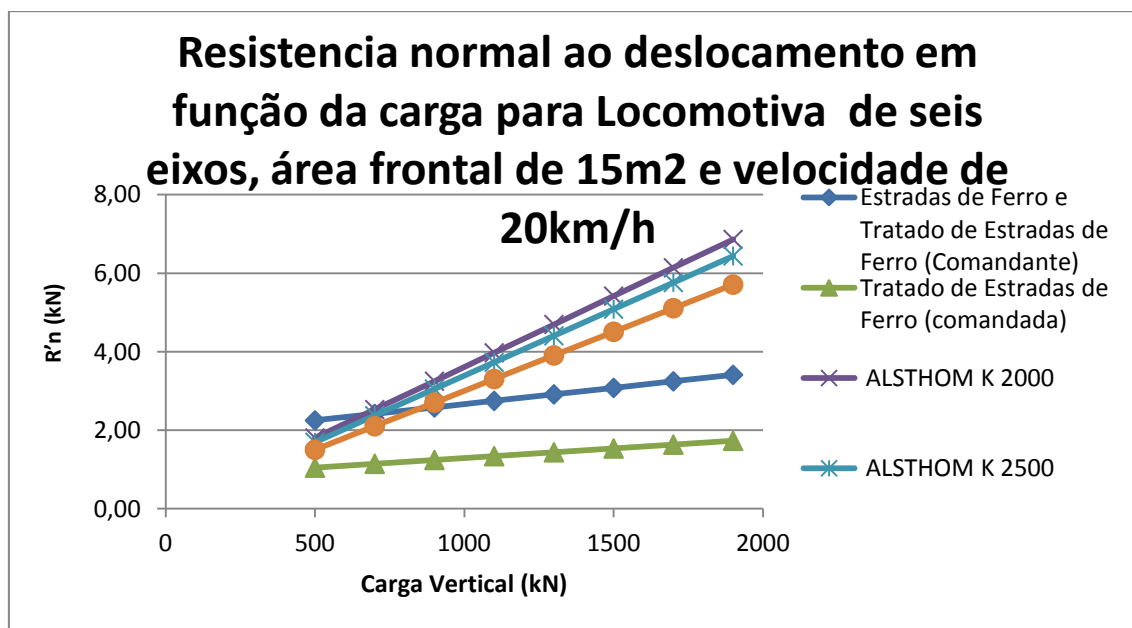


Figura 8 - Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva

Tabela 14 - Resistência Normal Total para variação da carga, V = 40 KM/h

V(km/h)	40	Resistencia Normal Total (kN)					
Cargas total (kN)	Ton/eixo	Estradas de ferro	Loc Comandant e (Tratado Est. Ferro)	Loc. Comandada (Tratado Est. Ferro)	ALSTHOM K 2000	ALSTHOM K 2500	ALSTHOM K 4400
500	8,49	2,34	2,37	1,14	1,93	1,79	1,56
700	11,89	2,54	2,58	1,28	2,70	2,51	2,18
900	15,29	2,74	2,78	1,41	3,47	3,22	2,80
1100	18,69	2,95	2,99	1,55	4,24	3,94	3,43
1300	22,09	3,15	3,19	1,68	5,01	4,66	4,05
1500	25,48	3,35	3,40	1,82	5,78	5,37	4,67
1700	28,88	3,55	3,60	1,95	6,55	6,09	5,29
1900	32,28	3,75	3,81	2,09	7,32	6,81	5,92

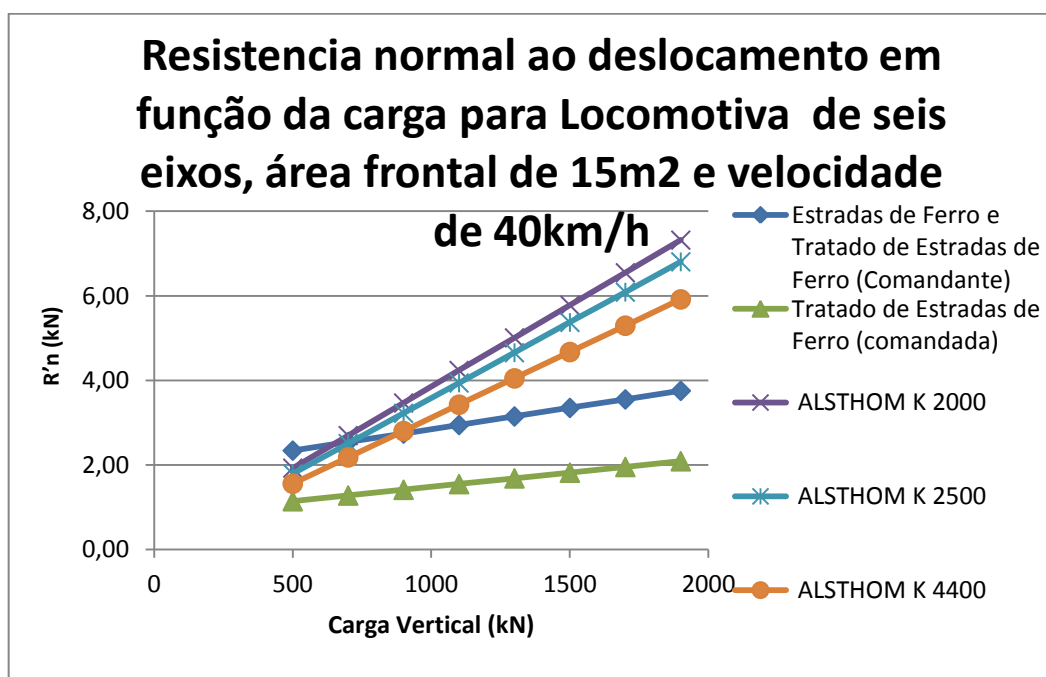


Figura 9 - Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva

Tabela 15 - Resistência Normal Total para variação da carga, V = 60 KM/h

V(km/h)	60	Resistencia Normal Total (kN)					
Carga total (kN)	Ton/eixo	Estradas de ferro	Loc. Comandante (Trat. Est de Ferro)	Loc. Comandada (Trat. Est de Ferro)	ALSTHO M K 2000	ALSTHO M K 2500	ALSTH OM K 4400
500	8,49	2,43	2,46	1,24	2,05	1,89	1,61
700	11,89	2,67	2,71	1,41	2,86	2,64	2,26
900	15,29	2,91	2,95	1,58	3,68	3,40	2,90
1100	18,69	3,14	3,19	1,76	4,50	4,15	3,55
1300	22,09	3,38	3,43	1,93	5,32	4,91	4,19
1500	25,48	3,62	3,68	2,10	6,14	5,66	4,84
1700	28,88	3,86	3,92	2,27	6,96	6,42	5,48
1900	32,28	4,10	4,16	2,45	7,77	7,17	6,12

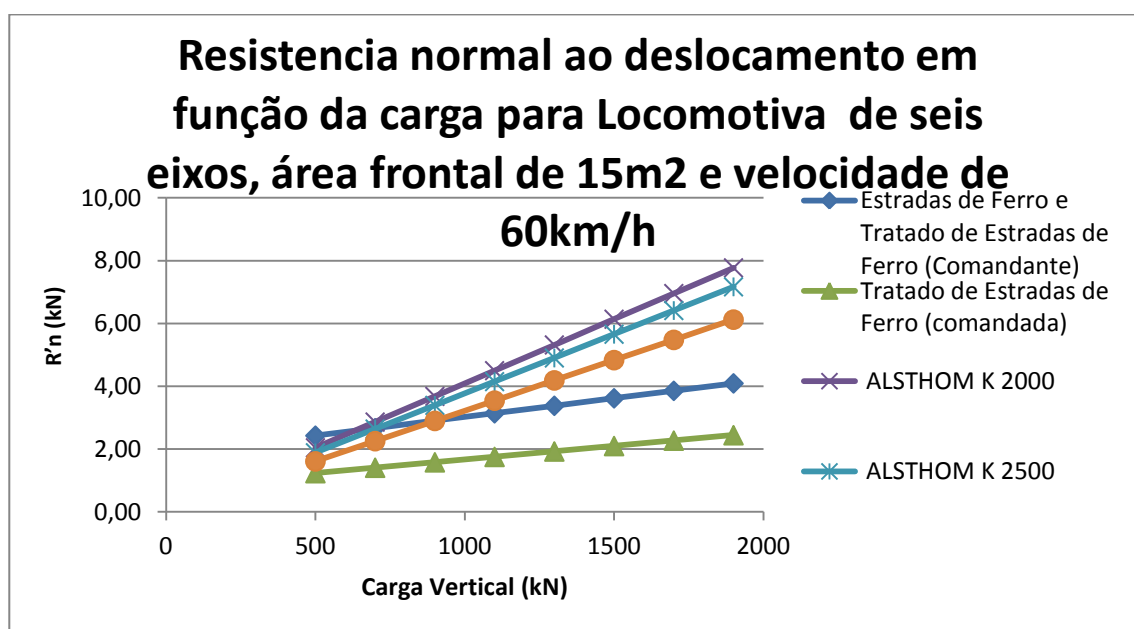


Figura 10 - Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva para 60 Km/h

Tabela 16 Resistência Normal Total para variação da carga, V = 80 KM/h

V(km/h)	80	Resistencia Normal Total (kN)					
Cargas total (kN)	Ton/eixo	Estradas de ferro	Loc. Comandante (Trat. Est. Ferro)	Loc. Comandada (Trat. Est. Ferro)	ALSTHOM K 2000	ALSTHO M K 2500	ALSTHO M K 4400
500	8,49	2,52	2,56	1,33	2,17	1,98	1,67
700	11,89	2,79	2,84	1,54	3,03	2,78	2,33
900	15,29	3,07	3,12	1,75	3,90	3,57	3,00
1100	18,69	3,34	3,40	1,96	4,77	4,36	3,67
1300	22,09	3,62	3,68	2,17	5,63	5,16	4,33
1500	25,48	3,89	3,96	2,38	6,50	5,95	5,00
1700	28,88	4,16	4,24	2,59	7,36	6,74	5,67
1900	32,28	4,44	4,52	2,80	8,23	7,53	6,33

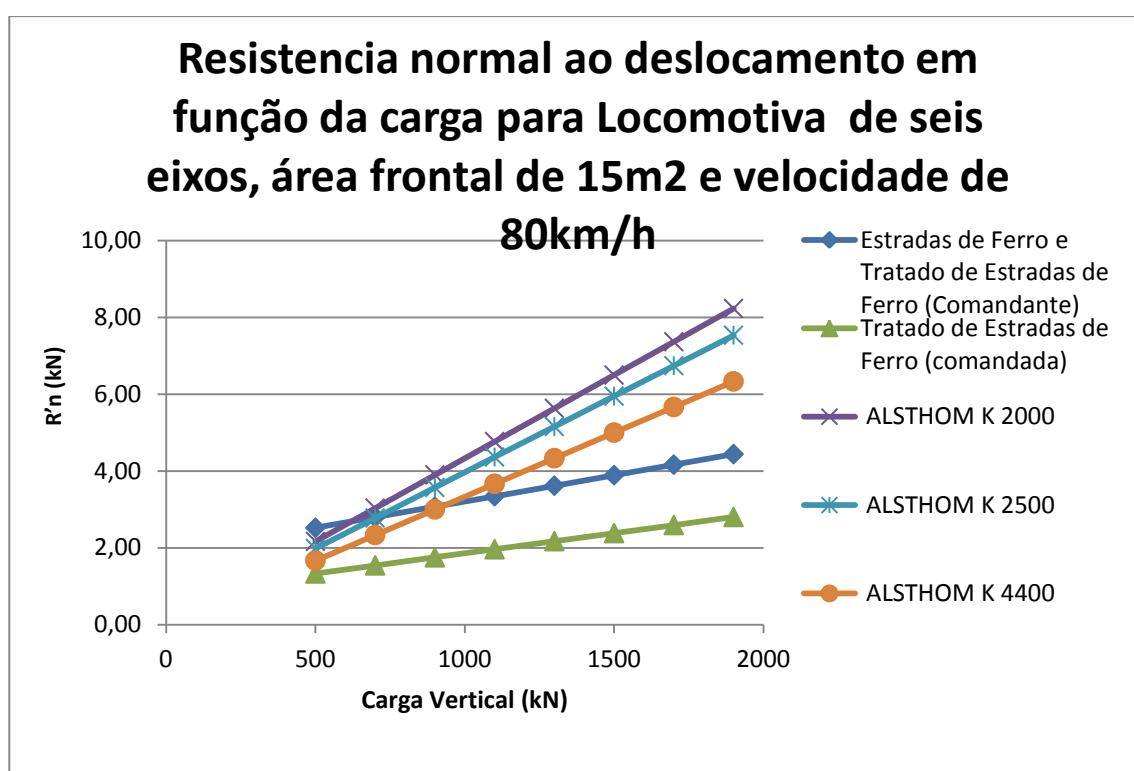


Figura 11 Resumo da resistência normal para todas as formulações obtidas de Locomotiva para 80 Km/h

Pode-se observar claramente que para locomotivas mais leves (em teoria, mais antigas, com tecnologias mais ultrapassadas) as resistências obtidas das diversas formas tem valores muito próximos, sendo que é provável portanto que as locomotivas utilizadas para medir esses parâmetros tenham sido locomotivas que hoje seriam considerada de pequeno porte, com pesos de cerca de 50 toneladas.

Para as cargas da ordem de locomotivas de minérios atuais, os valores das resistências chegam a ser 3 vezes maiores dependendo da fórmula a ser considerada. Em um caso onde se pagaria pela energia utilizada a mais que o que foi calculado, por exemplo, as perdas poderiam ser grandes.

### 7.5.2 Vagão

Para o caso dos vagões, foi realizada a análise apenas para a velocidade de 40 Km/h que é a mais usual no caso.

Tabela 17 - Resultados de formulações de resistência normal para vagões

Carga total (N)	Ton/eixo	Estradas de ferro	Tratado de Estradas de Ferro	ABA	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
200	5,1	0,98	1,69	0,74	0,77
350	8,9	1,16	1,82	0,80	0,92
500	12,7	1,35	1,94	0,86	1,08
650	16,6	1,52	2,07	0,92	1,23
800	20,4	1,68	2,20	0,99	1,38
950	24,2	1,84	2,33	1,05	1,54
1100	28,0	1,99	2,45	1,11	1,69
1250	31,9	2,13	2,58	1,18	1,84
1400	35,7	2,28	2,71	1,24	2,00

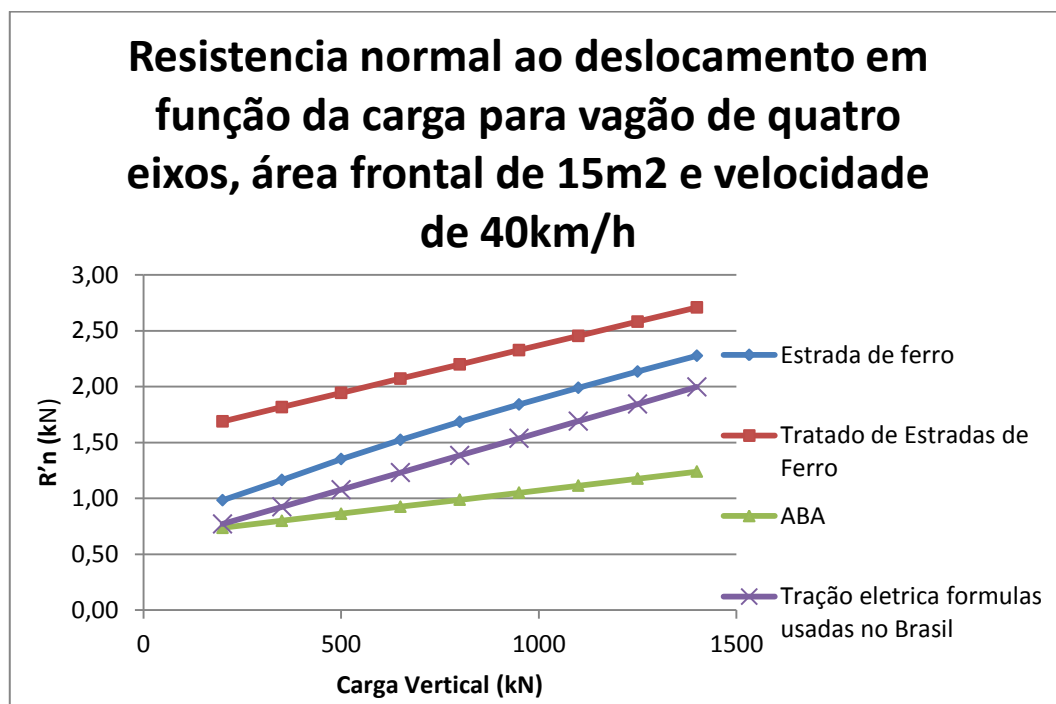


Figura 12 - Plotagem dos resultados obtidos

No caso das resistências normais em vagões de carga, os resultados não aparentam estar ligados a resultados em uma mesma faixa de valores de carga, sendo que a dispersão de resultados é semelhante para todos os valores possíveis de carga, desde cargas pequenas (tara, quando o vagão se encontra descarregado) até cargas altas, com o vagão completamente carregado.

## 7.6 Variação da Resistência normal em função da velocidade

### 7.6.1 Locomotiva G.E. Modelo C44-9WM

Peso total da locomotiva: 183.000 kg = 1823,4 kN

Tabela 18 - Resultados para resistência normal

Velocidade (km/h)	T/eixo	Resistencia Normal (kN)					
		Estradas de ferro	Tratado de Estradas de Ferro (comandante)	Tratado de Estradas de Ferro (comandada)	ALSTHOM K 2000	ALSTHOM K 2500	ALSTHOM K 4400
20	30,98	2,55	2,57	1,49	5,49	5,31	4,98
40	30,98	3,68	3,73	2,04	7,02	6,53	5,68
60	30,98	5,33	5,42	2,72	9,28	8,34	6,71
80	30,98	7,51	7,66	3,53	12,28	10,73	8,07
100	30,98	10,22	10,44	4,49	15,99	13,71	9,76

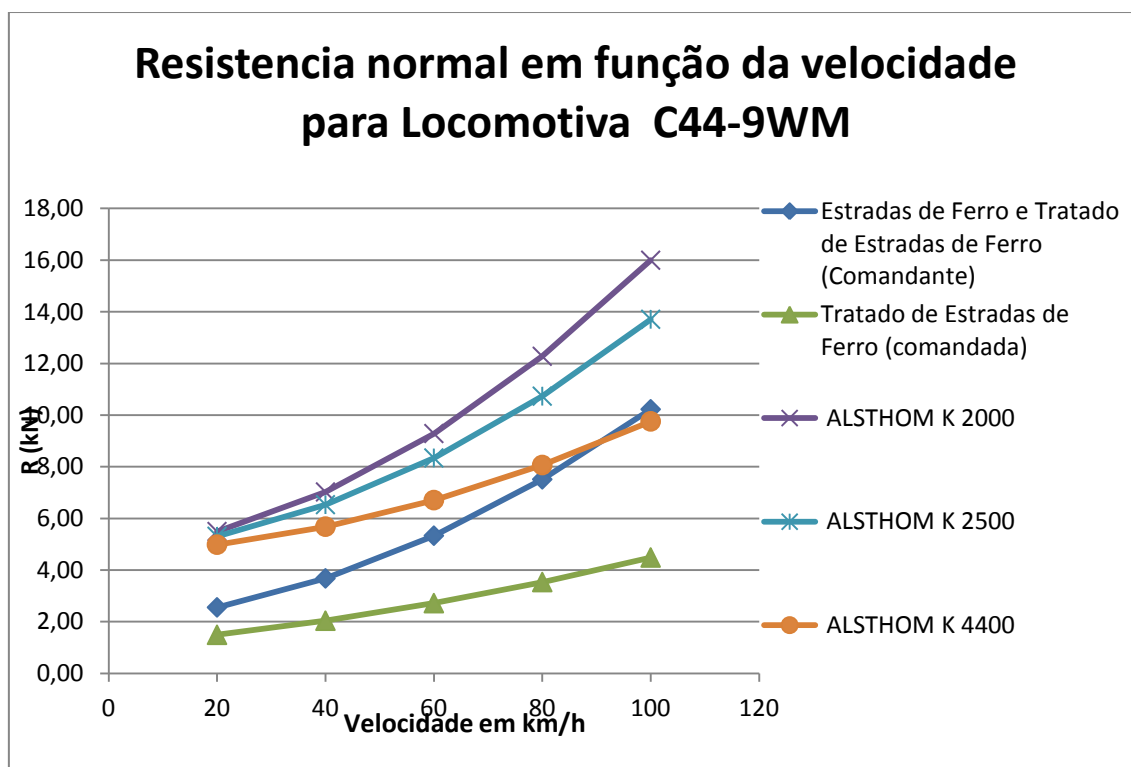


Figura 13 - Resistência normal em função da velocidade.

Tabela 19 - Resistência normal devido a A

Velocidade (km/h)	Ton/eixo	Resistencia Normal Devido A (kN)					
		Estradas de ferro	Tratado de Estradas de Ferro (comandante)	Tratado de Estradas de Ferro (comandada)	ALSTHOM K 2000	ALSTHO M K 2500	ALSTHO M K 4400
20	30,47	1,94	1,94	1,07	4,61	4,59	4,54
40	30,47	1,94	1,94	1,07	4,61	4,59	4,54
60	30,47	1,94	1,94	1,07	4,61	4,59	4,54
80	30,47	1,94	1,94	1,07	4,61	4,59	4,54
100	30,47	1,94	1,94	1,07	4,61	4,59	4,54

Tabela 20 - Resistência normal devido a B

Velocidade (km/h)	Ton/eixo	Resistencia Normal Devido B (kN)					
		Estradas de ferro	Tratado de Estradas de Ferro (comandante)	Tratado de Estradas de Ferro (comandada)	ALSTHOM K 2000	ALSTHO M K 2500	ALSTHOM K 4400
20	30,47	0,32	0,34	0,34	0,43	0,34	0,20
40	30,47	0,65	0,67	0,67	0,86	0,69	0,39
60	30,47	0,97	1,01	1,01	1,29	1,03	0,59
80	30,47	1,29	1,35	1,35	1,72	1,38	0,78
100	30,47	1,61	1,68	1,68	2,15	1,72	0,98

Tabela 21 - Resistência Normal devido a C

Velocidade (km/h)	Ton/eixo	Resistencia Normal Devido C (kN)					
		Estradas de ferro	Tratado de Estradas de Ferro (comandante)	Tratado de Estradas de Ferro (comandada)	ALSTHOM K 2000	ALSTHOM K 2500	ALSTHO M K 4400
20	30,47	0,26	0,27	0,07	0,36	0,29	0,16
40	30,47	1,06	1,08	0,27	1,43	1,15	0,65
60	30,47	2,38	2,44	0,61	3,23	2,58	1,47
80	30,47	4,24	4,33	1,08	5,74	4,59	2,61
100	30,47	6,62	6,77	1,69	8,97	7,17	4,08

É facilmente vista a influência do aumento ou diminuição da velocidade na resistência normal ao deslocamento da locomotiva, sendo que para velocidades altas o fator C, que multiplica o quadrado da velocidade se sobressai aos outros, e a resistência vem principalmente dele, enquanto para baixas velocidades o principal é o fator A, independente da velocidade.



Pode-se observar também que no caso das locomotivas comandadas o fator C é menor do que em locomotivas comandantes, isso porque ela não está de cara com o vento, logo a resistência causada pelo vento será bem menor quando houver uma locomotiva à frente.

### 7.6.2 Vagão Hopper Aberto

Para os gráficos em função da velocidade em vagões, utilizou-se o vagão Hopper Aberto com capacidade de 100 toneladas, completamente carregado citado anteriormente.

**Tabela 22 - Resistência em VHA**

Velocidade (km/h)	Resistencia Normal (kN)				
	Ton/eixo	Estrada de ferro	Tratado de Estradas de Ferro	ABA	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
20	24,97	1,07	1,46	0,58	1,10
40	24,97	1,43	1,65	0,76	1,31
60	24,97	1,85	1,90	1,02	1,52
80	24,97	2,34	2,21	1,35	1,75
100	24,97	2,88	2,59	1,77	1,99

**Tabela 23 - Res Normal devido a A (VHA)**

Velocidade (km/h)	Resistencia Normal Devido A (kN)				
	Ton/eixo	Estrada de ferro	Tratado de Estradas de Ferro	ABA	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
20	24,97	1,10	1,93	0,65	1,15
40	24,97	1,10	1,93	0,65	1,15
60	24,97	1,10	1,93	0,65	1,15
80	24,97	1,10	1,93	0,65	1,15
100	24,97	1,10	1,93	0,65	1,15

**Tabela 24 - Resistência Normal devido B (Vagão Hopper Aberto)**

Velocidade (km/h)	Resistencia Normal Devido B (kN)				
	Ton/eixo	Estrada de ferro	Tratado de Estradas de Ferro	ABA	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
20	24,97	0,27	0,10	0,06	0,18
40	24,97	0,55	0,20	0,12	0,36
60	24,97	0,82	0,29	0,18	0,55
80	24,97	1,10	0,39	0,24	0,73
100	24,97	1,37	0,49	0,29	0,91

**Tabela 25 - Resistência Normal devido a C (VHA)**

Velocidade (km/h)	Resistencia Normal Devido C (kN)				
	Ton/eixo	Estrada de ferro	Tratado de Estradas de Ferro	ABA	Tração elétrica fórmulas usadas no Brasil
20	24,97	0,06	0,06	0,07	0,01
40	24,97	0,22	0,23	0,29	0,05
60	24,97	0,50	0,51	0,66	0,11
80	24,97	0,89	0,91	1,18	0,19
100	24,97	1,40	1,43	1,84	0,30

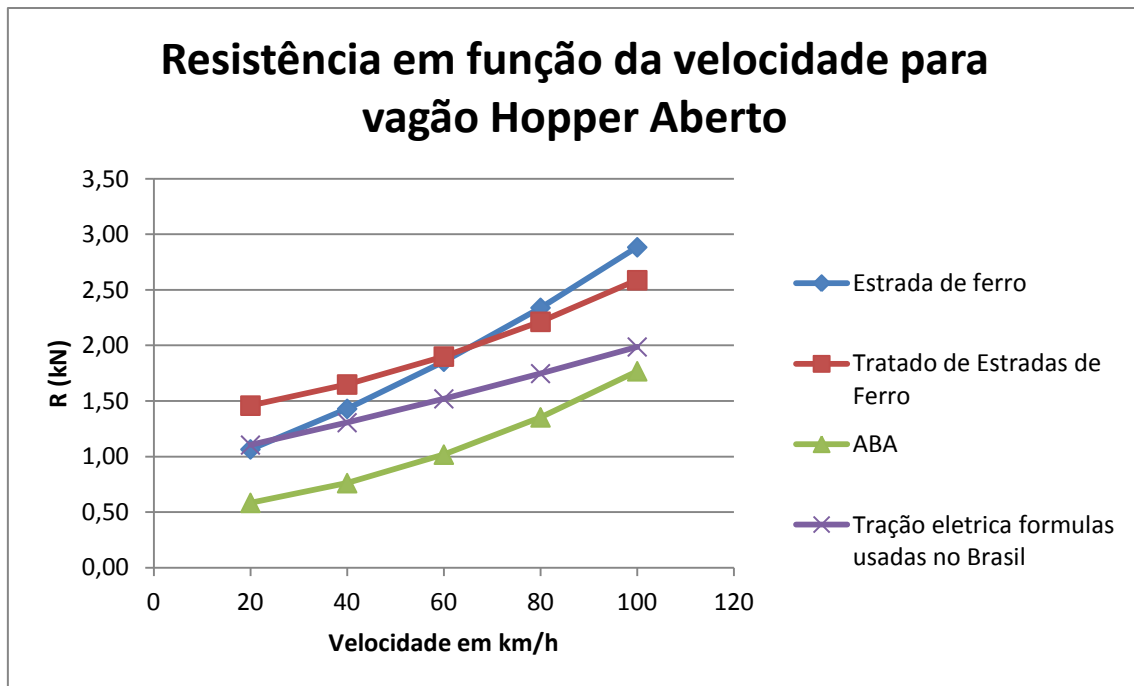


Figura 14 - Plotagem de resistência Vagão Hopper Aberto

No caso dos vagões fica evidente que a parcela referente à resistência do ar pouco contribui. Além disso, o grande responsável para a dispersão dos resultados é a resistência devido ao fator A, o que faz com que os valores encontrados em valores mais baixos de velocidade sejam muito diferentes entre si. Devemos destacar que as resistências encontradas pela fórmula utilizada no Brasil são bem menores do que as encontradas nas outras fórmulas, o que nos leva a crer que as resistências normais de vagão podem estar sendo subestimadas em estudos brasileiros.

## 8 ANÁLISE DA DIMENSÃO DAS RESISTÊNCIAS

Após todo o trabalho realizado, deu-se necessária uma maior compreensão das dimensões que as resistências normais e acidentais têm sobre o trem, ou seja, o efeito que elas provocam. Para esse objetivo específico, montou-se um modelo, que, dado um circuito específico, retorna a distância de parada de um trem de passageiros lotado, apenas para a atuação das forças de resistência ao movimento (também era possível analisar um trem de passageiros vazio, mas o foco foi no trem lotado, já que as resistências nesse caso são maiores).

Diferentes percursos poderiam ser analisados, mas inicialmente optou-se por uma pista ideal, de traçado reto e declividade 0 em todos os trechos para verificar o efeito apenas do tema principal do trabalho que se trata das resistências normais. O trem utilizado foi o trem da CAF – série 7000, com características expostas na figura a seguir:


TUE CAF-Série 7000		9 - Esmeralda (CPTM) 11 - Coral (CPTM) 12 - Safira (CPTM)  1 - Azul (MetroBH)  Centro 1 (MetroREC) Centro 2 (MetroREC) Sul (MetroREC)	
		Especificações	
Trem Unidade Elétrica CAF série 7000		Corpo	Aço Inox
		Comprimento do veículo	com cabine: 21,92 m intermediário: 20,61 m
		Largura	3,05 m
		Altura	3,93 m
		Altura do Piso	1,33 m
		Altura da plataforma	1100 mm
		Portas	8 por carro (4 de cada lado)
		Velocidade máxima	100 km/h
		Peso	179 toneladas
		Aceleração	0,90 m/s <sup>2</sup>
		Desaceleração	Serviço: 1,10 m/s <sup>2</sup> Emergência: 1,20 m/s <sup>2</sup>
		Tipo de tração	inversor VVVF IGBT
		Motor	motores assíncronos AC
		Potência	2.860 kW
		Tipo de transmissão	elétrica
		Tipo de climatização	ar condicionado
		Alimentação	3000 Vcc
		Captação de energia	Catenária
		Classificação UIC	Bo'Bo' + 2'2' + 2'2' + Bo'Bo'
		Freios	Elétricos regenerativos, 2 discos de freio (na alma da roda) por eixo
		Acoplamento	Scharfenberg
		Bitola	1.600 mm
Período de serviço	2010-presente		
Fabricante	Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles - CAF		
Período de construção	2009-2011		
Entrada em serviço	2010		
Total construídos	40 (80 TUE's, estando 2 destas inoperacionais aguardando reparos)		
Total em serviço	38 (76 TUE's)		
Formação	4 carros (operando com 2 TUE's acoplados cada)		
Capacidade	1.004 passageiros por TUE (228 sentados)		
Operador	CPTM CBTU		
Linhas	7 - Rubi (CPTM)		

Figura 15 - Características do trem TUE CAF Série-7000

Pode-se ver que é um trem bastante utilizado, novo, portanto é bom para confrontar com a bibliografia. Apesar do trem ter capacidade para operar a 100 km/h, a velocidade máxima de operação de trens da CPTM é de 80km/h (22,22m/s), que foi a utilizada.

Os dados de entrada do modelo são:

- Circuito (curvas, retas, declividades).
- Velocidade inicial.
- Trem utilizado.

Com estes dados no modelo, foi utilizado o teorema da energia cinética, isso é: Variação da energia cinética é igual ao trabalho realizado.

Assim, em intervalos de tempo suficientemente pequenos, no caso 1 segundo, podemos dizer que a variação da energia cinética é dada pela força de resistência aplicada naquele instante multiplicada pela distância percorrida neste intervalo de tempo. Isso é equivalente à realização da integral das forças. A partir da variação da energia cinética, pode-se determinar a nova velocidade do trem.

Tabela 26 - Início do modelo de parada do trem.

V1 (m/s)	Em1 (J)	R1(kg)	R2(kg)	Ra (N)	Rb (N)	Rc (N)	Rtotal(N)	DistΔt (m)	Trab. (J)	Em2 (J)	V2 (m/s)	T total (s)	Dist(km)
22,22	61.860.049	534,82	238,71	4.694	2.747	4.831	12.272	22,22	272.706	61.587.344	22,17	1,00	0,02
22,17	61.587.344	533,15	238,34	4.694	2.741	4.810	12.244	22,17	271.497	61.315.846	22,12	2,00	0,04
22,12	61.315.846	531,48	237,97	4.694	2.735	4.789	12.217	22,12	270.295	61.045.551	22,08	3,00	0,07
22,08	61.045.551	529,81	237,60	4.694	2.729	4.768	12.190	22,08	269.100	60.776.451	22,03	4,00	0,09
22,03	60.776.451	528,16	237,23	4.694	2.723	4.747	12.163	22,03	267.910	60.508.541	21,98	5,00	0,11
21,98	60.508.541	526,51	236,87	4.694	2.717	4.726	12.136	21,98	266.727	60.241.814	21,93	6,00	0,13
21,93	60.241.814	524,87	236,50	4.694	2.711	4.705	12.109	21,93	265.550	59.976.263	21,88	7,00	0,15
21,88	59.976.263	523,24	236,14	4.694	2.705	4.684	12.082	21,88	264.380	59.711.884	21,83	8,00	0,18
21,83	59.711.884	521,61	235,78	4.694	2.699	4.664	12.056	21,83	263.215	59.448.668	21,78	9,00	0,20

Onde:

- Em1 e Em2 são as energias cinéticas final e inicial respectivamente, no intervalo 1 segundo.
- V1 e V2 são as velocidades final e inicial respectivamente, do intervalo.
- R1 é a resistência total do carro líder.
- R2 é a resistência de carros comandados.
- Ra, Rb e Rc são as resistências devidas aos coeficientes A, B e C.
- Rtotal é a resistência normal.
- DistΔt é a distância percorrida no intervalo de 1 segundo.
- Trab é o trabalho realizado no intervalo (considerando a força como constante no mesmo).
- T total é o contador do tempo.
- Dist é a distância total percorrida.

Pode-se ver que a diferença entre  $R_1$  e  $R_2$  é grande, e é causada pelo arrasto do ar, que é muito superior no carro líder, já que é quem “quebra” o vento.

Tabela 27 - Final da tabela do modelo

V1 (m/s)	Em1 (J)	R1(kg)	R2(kg)	Ra (N)	Rb (N)	Rc (N)	Rtotal(N)	DistΔt (m)	Trab. (J)	Em2 (J)	V2 (m/s)	T total (s)	Dist(km)
0,25	7.729	120,44	120,40	4.694	31	1	4.725	0,25	1.174	6.555	0,23	772,00	7,33
0,23	6.555	120,37	120,34	4.694	28	1	4.722	0,23	1.080	5.475	0,21	773,00	7,33
0,21	5.475	120,30	120,27	4.694	26	0	4.720	0,21	987	4.488	0,19	774,00	7,33
0,19	4.488	120,23	120,21	4.694	23	0	4.717	0,19	893	3.595	0,17	775,00	7,33
0,17	3.595	120,17	120,15	4.694	21	0	4.715	0,17	799	2.797	0,15	776,00	7,33
0,15	2.797	120,10	120,08	4.694	18	0	4.712	0,15	704	2.092	0,13	777,00	7,33
0,13	2.092	120,03	120,02	4.694	16	0	4.710	0,13	609	1.484	0,11	778,00	7,33
0,11	1.484	119,96	119,96	4.694	13	0	4.707	0,11	512	971	0,09	779,00	7,33
0,09	971	119,89	119,89	4.694	11	0	4.705	0,09	414	557	0,07	780,00	7,33
0,07	557	119,82	119,82	4.694	8	0	4.702	0,07	314	244	0,04	781,00	7,33
0,04	244	119,75	119,75	4.694	5	0	4.699	0,04	207	36	0,02	782,00	7,33
0,02	36	119,67	119,67	4.694	2	0	4.696	0,02	80	- 44	0	783,00	7,33

Pode-se ver, no modelo, que o trem, somente com a ação da resistência normal, tem uma distância de parada de 7,33 Km, saindo de uma velocidade de 80 quilômetros por hora, e o tempo total foi de 783 segundos, que representam cerca de 12 minutos e meio.



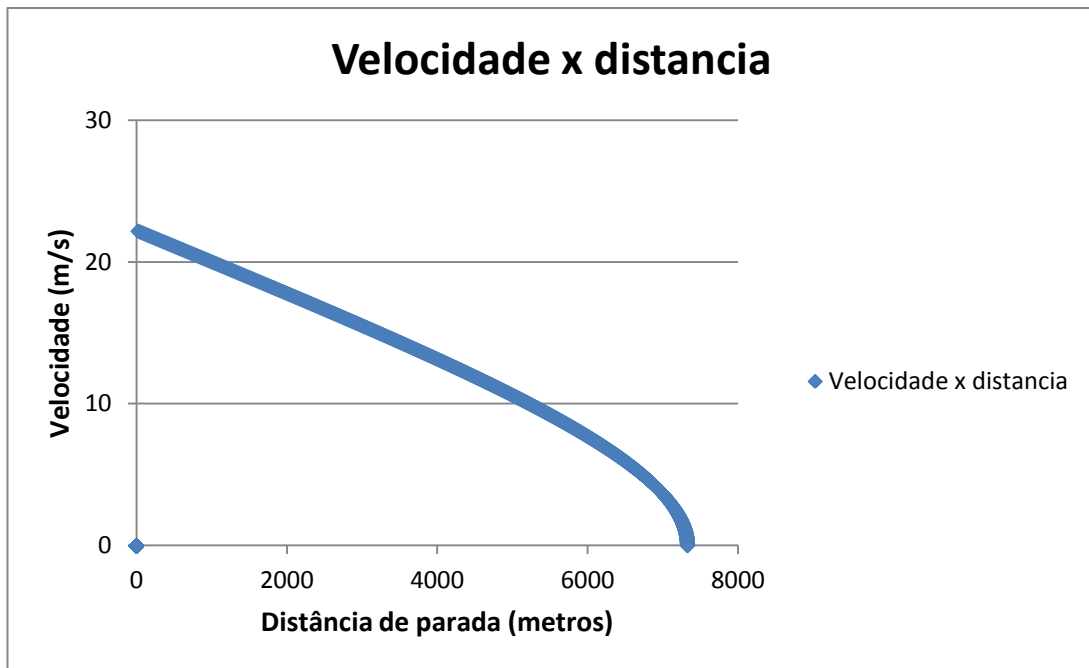


Figura 16 - Velocidade x Distância percorrida

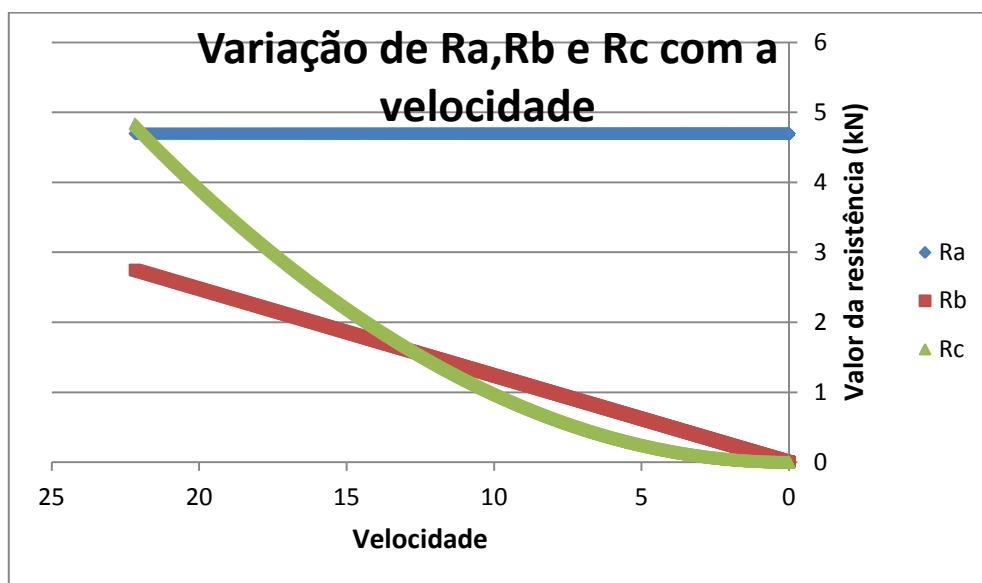


Figura 17 - Variação das parcelas da resistência com a velocidade

Como podemos ver o trem percorre uma grande distancia para poder parar totalmente, pois as forças de resistência são de pequena dimensão (maior força de resistência igual a 11,7kN). Além disso, percebemos que a força de resistência devido o fator A é muito maior do que a do fator B, para essa faixa de valores. No caso do fator C, a força devido ao mesmo chega a ter um valor maior do que a força devido o fator A. Porém, no caso da CPTM, as velocidades médias de operação são na faixa de 30 e 40km/h. Nessa faixa de velocidade a resistência devido ao fator B e C possuem valores muito menos do que a devido ao fator A ( $R_a \sim 0,25R_b$ ;  $R_a \sim 0,25R_c$ ). O que de certo modo

justifica o procedimento dos fabricantes de desprezarem a resistência devido ao vento no cálculo do consumo energético, por exemplo.

Em uma segunda simulação foi acrescentada uma rampa com inclinação de 1%, e o trem também inicialmente com velocidade de 80km/h (22,22m/s).

Tabela 28 - Tabela com resistências normal e de rampa.

V1 (m/s)	Em1 (J)	R1(kg)	R2(kg)	Rnormal (N)	Rrampa (N)	Rtotal(N)	DistΔt (m)	Trab. (J)	Em2 (J)	V2 (m/s)	T total (s)	Dist(km)
22,22	61.860.049	534,82	238,71	12.272	24.577	36.849	22,22	818.868	61.041.181	22,07	1,00	0,02
22,07	61.041.181	529,79	237,59	12.190	24.577	36.767	22,07	811.616	60.229.566	21,93	2,00	0,04
21,93	60.229.566	524,79	236,48	12.108	24.577	36.685	21,93	804.413	59.425.153	21,78	3,00	0,07
21,78	59.425.153	519,84	235,38	12.027	24.577	36.604	21,78	797.259	58.627.893	21,63	4,00	0,09
21,63	58.627.893	514,93	234,29	11.947	24.577	36.524	21,63	790.154	57.837.739	21,49	5,00	0,11
21,49	57.837.739	510,06	233,20	11.867	24.577	36.444	21,49	783.097	57.054.643	21,34	6,00	0,13
21,34	57.054.643	505,23	232,12	11.788	24.577	36.365	21,34	776.087	56.278.556	21,20	7,00	0,15
21,20	56.278.556	500,44	231,04	11.709	24.577	36.286	21,20	769.124	55.509.432	21,05	8,00	0,17
21,05	55.509.432	495,69	229,98	11.631	24.577	36.208	21,05	762.208	54.747.224	20,91	9,00	0,19
20,91	54.747.224	490,98	228,91	11.553	24.577	36.131	20,91	755.337	53.991.887	20,76	10,00	0,22
20,76	53.991.887	486,31	227,86	11.477	24.577	36.054	20,76	748.513	53.243.374	20,62	11,00	0,24
20,62	53.243.374	481,68	226,81	11.400	24.577	35.978	20,62	741.733	52.501.642	20,47	12,00	0,26
20,47	52.501.642	477,09	225,77	11.325	24.577	35.902	20,47	734.997	51.766.644	20,33	13,00	0,28
20,33	51.766.644	472,53	224,73	11.249	24.577	35.827	20,33	728.306	51.038.338	20,19	14,00	0,30
20,19	51.038.338	468,01	223,70	11.175	24.577	35.752	20,19	721.658	50.316.680	20,04	15,00	0,32

...

**Tabela 29 - Final do modelo de simulação.**

<b>V1 (m/s)</b>	<b>Em1 (J)</b>	<b>R1(kg)</b>	<b>R2(kg)</b>	<b>Rnormal (N)</b>	<b>Rrampa (N)</b>	<b>Rtotal(N)</b>	<b>DistΔt (m)</b>	<b>Trab. (J)</b>	<b>Em2 (J)</b>	<b>V2 (m/s)</b>	<b>T total (s)</b>	<b>Dist(km)</b>
1,87	439839,17	127,97	125,86	4959,53	24577,31	31503,02	1,87	59031,18	380807,99	1,74	151,00	1,79
1,74	380807,99	127,23	125,41	4938,81	24577,31	31482,31	1,74	54891,10	325916,90	1,61	152,00	1,79
1,61	325916,90	126,51	124,95	4918,39	24577,31	31461,88	1,61	50748,18	275168,72	1,48	153,00	1,79
1,48	275168,72	125,82	124,50	4898,25	24577,31	31441,74	1,48	46600,27	228568,44	1,35	154,00	1,79
1,35	228568,44	125,14	124,05	4878,38	24577,31	31421,87	1,35	42444,61	186123,84	1,22	155,00	1,80
1,22	186123,84	124,49	123,60	4858,76	24577,31	31402,26	1,22	38277,56	147846,28	1,09	156,00	1,80
1,09	147846,28	123,86	123,15	4839,39	24577,31	31382,88	1,09	34094,19	113752,09	0,95	157,00	1,80
0,95	113752,09	123,25	122,70	4820,23	24577,31	31363,72	0,95	29887,51	83864,59	0,82	158,00	1,80
0,82	83864,59	122,66	122,26	4801,25	24577,31	31344,74	0,82	25646,98	58217,60	0,68	159,00	1,80
0,68	58217,60	122,08	121,81	4782,37	24577,31	31325,86	0,68	21355,64	36861,96	0,54	160,00	1,80
0,54	36861,96	121,53	121,35	4763,49	24577,31	31306,98	0,54	16982,94	19879,03	0,40	161,00	1,80
0,40	19879,03	120,98	120,88	4744,35	24577,31	31287,84	0,40	12463,95	7415,08	0,24	162,00	1,80
0,24	7415,08	120,42	120,38	4724,21	24577,31	31267,70	0,24	7607,40	-192,32	#NÚM!	163,00	1,80

Como podemos ver a força de resistência de rampa é muito maior do que a resistência normal ( $R_{\text{rampa}} \sim 10R_{\text{normal}}$ ), o que reflete em uma distância muito menor que o trem até pare de se movimentar (1,8Km contra 7,33 Km quando havia apenas a resistência normal). Isso mostra a inviabilidade de se estudar as resistências normais em uma pista onde não se tem certeza sobre a sua geometria, com dados como inclinação e curvas presentes.

## **9 MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA**

Existem algumas metodologias utilizadas, principalmente, para determinar as resistências ao movimento, e que conseqüentemente também são utilizados na obtenção dos coeficientes da equação de Davis, todos aplicadas de forma experimental. Cada metodologia tem seus pontos positivos e negativos, sendo eles relacionados principalmente à custos e à precisão. As principais metodologias utilizadas são:

- Métodos de Inércia.
- Métodos de dinamômetros e cabo de tração.
- Métodos de Forças de Tração.

O método de medição da inércia é o principal e mais utilizado. O procedimento básico consiste em primeiramente levar o trem à uma certa velocidade em uma seção de via com um gradiente razoavelmente estável e conhecido e, quando se chega no ponto de referência, à velocidade desejada, não há mais aceleração nem frenagem no trem. A partir deste momento, são coletados a velocidade e o tempo em de pontos de medição uniformemente espalhados no percurso.

Como ocorre uma diminuição na velocidade, e conseqüentemente na energia cinética por conta da resistência ao movimento. Assim, igualando a variação de energia cinética ao trabalho da força resistiva, atuando no trecho, obtemos a resistência média no trecho. Em seguida, meio de processos de interpolação obtém-se o gráfico representativo da resistência em relação à velocidade. Em alguns métodos temos o uso de acelerômetros de pêndulos de inércia, que são mais sensíveis às irregularidades da pista.

É possível incluir perdas por resistência em marcha lenta, e por motores, o que torna um pouco mais trabalhoso, mas ao mesmo tempo, não tem os inconvenientes de outros métodos que tem mais fontes de erro em diferentes sistemas de medição.

O segundo método, como o próprio nome sugere, utiliza um dinamômetro, que realiza a medição da resistência ao rolamento das partes do trem (locomotivas e vagões). Para esse ensaio, o dinamômetro deve ser colocado entre veículo que funciona como guincho e o cabo que se liga à locomotiva (ou

ao vagão). As partes devem ser puxadas suavemente e a pista deve ser em linha reta, com gradiente constante. Os principais problemas desse método são o fato de que o próprio dinamômetro pode contribuir para gerar erros de precisão e que ele mede apenas a resistência para os veículos ligados ao “guincho”, não sendo possível a obtenção da resistência para o trem como um todo. Nesse método é preciso compensar as forças de frenagem e aceleração, que podem ser calculadas relacionando-se a massa do veículo e a aceleração imposta.

No método de força de tração, as medidas são feitas com o trem em movimento. A resistência ao rolamento pode ser estimada medindo a força trativa imposta pelo sistema de tração. O ensaio deve ser feito, preferencialmente, a velocidade constante e devem ser compensadas, em caso de mudança de velocidade, as forças de aceleração e desaceleração. Também devem ser descontadas as forças consequentes do traçado da via, como as oriundas de mudanças de cotas e curvas.

## **10 APLICAÇÕES:**

Dando sequencia ao trabalho, nosso objetivo seria compararmos os coeficientes pesquisados com os resultados obtidos em um teste real de trem. Para isto, visitamos a empresa (CAF), responsável pela fabricação de trens para a Linha 8 da CPTM e também a própria CPTM, obtendo os gráficos de testes, apresentados nas figuras 25, 26 e 27, anexas.

Nos referidos testes, elevou-se a velocidade dos trens até determinado valor, após o que houve “corte do esforço de tração” e o trem freado pelo efeito do chamado freio dinâmico (resultante da resistência nas espiras dos motores de tração) e do freio pneumático. Com certeza, o efeito da resistência normal contribui para as referidas frenagens, mas a identificação de seu valor torna-se imprecisa, porque seu efeito está “embutido” na frenagem do trem. Também não existe o conhecimento preciso das cotas da via de teste, assim não temos como determinar as resistências devido ao efeito de rampa.

Para que pudéssemos isolar o efeito das resistências normais pelo método de inércia, por exemplo, teríamos que dispor de teste em que o trem, após levado a determinada velocidade, tivesse a tração cortada e seguisse seu movimento livremente em uma via de traçado conhecido. Nesta situação, o trem pararia apenas pelo efeito das resistências normais e acidentais, sendo possível estimar o valor destas forças pela igualdade entre a variação na Energia Cinética e o “trabalho” das resistências ao longo da distância de frenagem. Não dispomos, contudo, de recursos e tempo para este ensaio especial.

Diante da impossibilidade de obter, com os meios de que dispomos, valor experimental numérico que nos permitisse aferir as fórmulas que pesquisamos,

decidimos dar andamento ao trabalho, apresentando um exemplo da aplicação do método de inércia, uma lista das aplicações típicas das expressões para a resistência normal em termos de Engenharia Ferroviária e um exemplo prático do processo de escolha dos motores de um trem da CPTM.

### **10.1 Exemplo de Aplicação de medição de resistência ao movimento:**

O exemplo foi extraído da Tese de Doutorado de Lukaszewicz [6], e consiste em alguns testes para medição das resistências normais, em alguns tipos de veículos ferroviários, para posteriormente obter os coeficientes A, B e C.

#### **10.1.1 Metodologia:**

- Considerações iniciais:

O Método de cálculo utilizado no exemplo encontrado é o método da medição da inércia. A resistência ao movimento do trem é dividida em resistência mecânica (coeficientes A e Bv da equação de Davis) e arraste aerodinâmico do ar (coeficiente  $Cv^2$  da equação de Davis).

- Método de cálculo:

Com o trem em velocidade constante, o que exclui forças de aceleração ou de frenagem, a única força não conhecida é a da resistência ao movimento do trem (As cotas são conhecidas, pode-se calcular a energia potencial).

A única força que produz dissipação de energia, portanto, é a força de resistência ao movimento, que tem sua parcela mecânica, relativa ao atrito com o ar, e a parcela de arraste aerodinâmico. O trabalho dessa força é calculado segundo a seguinte fórmula:

O trabalho realizado pela força de um ponto a outro pode ser igualado à energia relativa à essa força. Somando-se as energias cinética e potencial inicial, pode-se igualar à energia final, pela lei de conservação da energia:

Os pontos são chamados de “a” e “k” é o número de espaçamentos que há entre os pontos calculados.

Abrindo-se a equação, colocando todos os fatores que influenciam, pode-se obter uma fórmula confiável para a força de resistência ao movimento.

Para que o cálculo da energia potencial fosse realizado com precisão, foram distribuídas as massas de todos os vagões nos cálculos:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{m_3}{m_4} \quad )$$

Onde:

- A velocidade é simplesmente calculada pela distância percorrida pelo tempo.
- é um fator que leva a rotação inercial em conta.
- é a altitude do veículo em questão.

O Passo a passo deste método pode ser descrito da seguinte maneira:

1. Escolha de um local de medição, onde sejam conhecidas com precisão as condições de pista, como gradientes e curvas.
2. Escolha de um ponto de referência no trem.
3. Definição dos intervalos de medição, que definirão a distância entre pontos de medição consecutivos. Nesses pontos a energia total do trem será determinada.
4. Para cada ponto de medição, determinar a altitude, as cotas onde os centros de gravidade de cada veículo estarão. Isto serve para que se calcule a energia potencial com maior precisão.
5. Acelerar o trem até a velocidade desejada.
6. Começar a perder velocidade pouco antes do primeiro ponto de medição, de modo a evitar oscilações de mudanças.
7. Medição da velocidade, e com ela das energias cinética e potencial.
8. Cálculo da dissipação energética.
9. Plotagem das forças de resistência obtidas de modo a aproximar a uma função polinomial.
10. Determinação da velocidade e direção do vento durante o ensaio, de modo a minimizar fontes de erro.

#### **10.1.2 Condições de Medição:**

O teste foi feito com 4 tipos de trens:

- Trens de transporte de passageiros.
- Trens de alta velocidade.
- Trens de carga.
- Trens carregando minérios.

Dentre esses tipos de trens que foram testados, será estudado apenas o caso dos trens de transporte de passageiros convencional, para que depois possa ser feita a comparação com os trens do metrô ou CPTM de São Paulo.



Locomotiva usada: SJ Rc

Vagões: SJAB3RT. Se

- Condições atmosféricas:  
Estão resumidas na tabela seguinte :

**Tabela 30 - Condições atmosféricas do teste realizado**

<b>Trem</b>	<b>temp(°C), (min, max)</b>	<b>vel. do vento, (min, max)</b>	<b>pressão atm. (hPa) (min, max)</b>
passageiros convencional	2,5 (-7,7)	3,4(1,2/10,0)	994,(983/1025)

- Condições de ventilação:  
A ventilação dos vagões foi desligada durante os testes enquanto que a locomotiva usava 15,2 m<sup>3</sup>/s de ar para ventilação.
- Características da via:  
São definidas na tabela a seguir:

**Tabela 31 - Condições de pista**

	<b>pista 1</b>	<b>pista 2</b>
<b>Massa do trilho(kg/m)</b>	50	43
<b>Tipo de trilho</b>	Soldado, CWR	Com juntas
<b>Tipo de plataforma</b>	Borracha dura	Aço
<b>Dormente</b>	Concreto, SJ 101	Madeira com folga de 65 cm
<b>Balastro</b>	Macadame	Brita
<b>Curvas</b>	Reto	Reto

- Medição de Velocidade:

Utilização do tacômetro.

- Distâncias medidas:

As distâncias medidas variaram de acordo com os tipos de trem testados, e também de acordo com a pista. Os valores utilizados foram entre = 1000m e = 100m com velocidades acima e abaixo dos 10m/s

- Resultados do teste:

**Tabela 32 - Resultados obtidos**

<b>Trem</b>	<b>Config</b>	<b>Eixos de carga</b>	<b>Massa total (toneladas)</b>	<b>Comprimento total(m)</b>	<b>Pista</b>	<b>A (N)</b>	<b>B (Ns/m)</b>	<b>C (Ns<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)</b>
<b>P1</b>	loco+1	4	124	40	1	<b>2150</b>	<b>8</b>	<b>6,9</b>
<b>P2</b>	loco+5	20	300	145	1	<b>3300</b>	<b>28</b>	<b>10,8</b>
<b>P3</b>	loco+9	36	476	251	1	<b>4400</b>	<b>48</b>	<b>14,7</b>
<b>P3</b>	loco+9	36	476	251	2	<b>5050</b>	<b>113</b>	<b>14,9</b>
<b>P4</b>	loco+13	52	562	356	1	<b>5500</b>	<b>68</b>	<b>18,6</b>

### 10.1.3 Estudo dos erros:

Os erros que temos são 3, de acordo com a medição de:

- Resistência ao movimento como função da velocidade
- Massa do trem
- Inércia de rotação

#### 10.1.3.1 Resistência ao movimento como função da velocidade

Erros na medida da velocidade:

- Erros do aparelho: 0,002 m/s
- Variação do raio da roda devido á variação da distância em rodas com forma cônica.
- Variação oscilatória longitudinal nos movimentos do trem de medida.

Erros na altitude:  $h_i$

- Erros do aparelho: +10 mm até -80 mm
  - Caso a medida seja feita com  $X = 100m$  o valor de  $h_i = -80 mm$  não é comum. Neste caso  $h_i = +10 mm -40 mm$

Erros nas distancias:

- Erros de aparelho: 0,1% caso de rodas cilíndricas e 0,3% para rodas cônicas

Em resumo, o valor medido dos erros está definido na tabela mostrada a seguir:

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l} 0,052 \text{ m/s para ruedas cilíndricas} \\ 0,052+0,002v \text{ m/s para rodas cônicas.} \end{array} \right. \\
 h_i \left\{ \begin{array}{l} +10\text{mm para todas } X \\ -40\text{mm si } X=100\text{m} \\ -80\text{mm si } \end{array} \right. \\
 \left\{ \begin{array}{l} 0,001 \text{ para rodas cilíndricas} \\ 0,003 \text{ para rodas conicas} \end{array} \right.
 \end{array}$$

#### 10.1.3.2 Massa do trem:

O erro na medição da massa é aproximadamente de 500kg/veículo

#### 10.1.3.3 Inércia á rotação:

O erro na medição da inércia á rotação foi de aproximadamente 120 kg/eixo de roda.

#### 10.1.4 Resultados\_Gráficos:

Com os dados obtidos através das medições realizadas, pôde-se calcular os coeficientes A, Bv e Cv<sup>2</sup> com precisão.

Os valores foram obtidos na pista 1. Com um mesmo trem, passando-se da pista 1 para a pista 2, os resultados tem uma diferença significativa, já que foram mudados quase todos os materiais presentes no trilho.

### 10.1.5 Variação do coeficiente A:

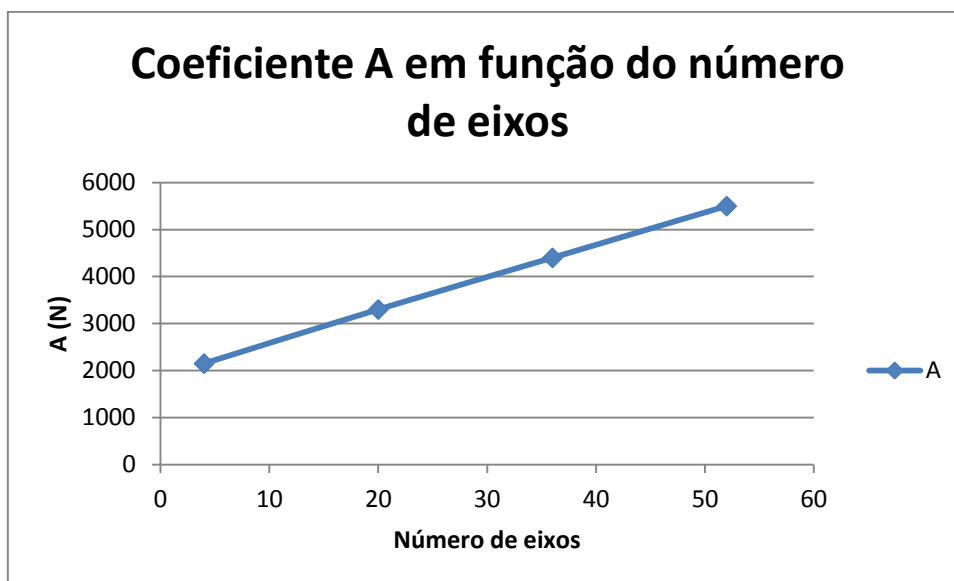


Figura 18 - Variação do coeficiente A obtido.

O gráfico foi realizado em termos de número de eixos porque em um trem de passageiros, o carregamento é realizado da mesma forma para todos os vagões. Pode-se ver que o coeficiente A varia linearmente com a carga presente no trem.

### 10.1.6 Variação do coeficiente B:

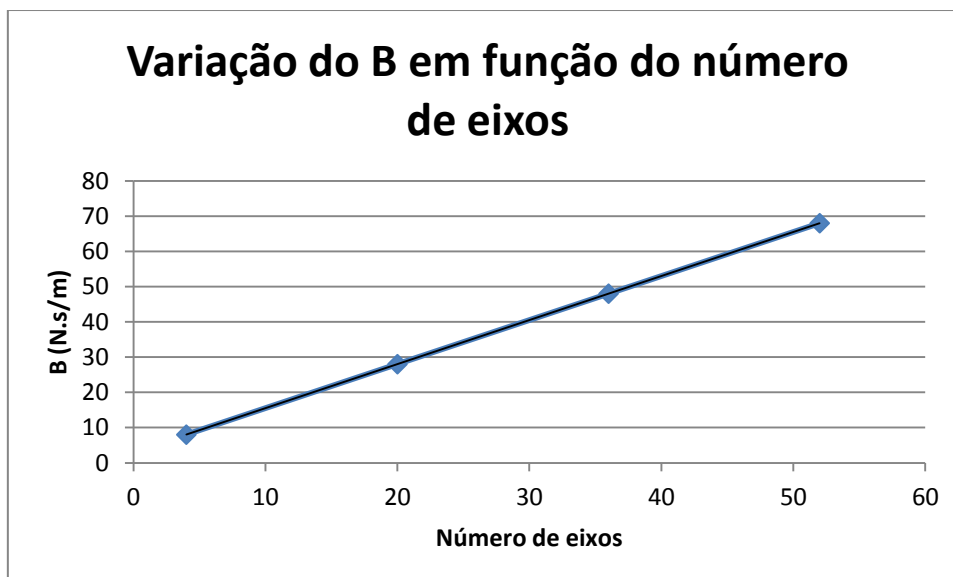


Figura 19 - Variação do coeficiente B em função do número de eixos

Pôde-se ver que o coeficiente B também varia praticamente linearmente em função do número de eixos. A equação para B em função do número de eixos é:

$$B = 3 + 1,25$$

Se os mesmos valores fossem plotados em um gráfico em função do tamanho do trem, o resultado também seria linear:



Figura 20 - Variação do B em função do tamanho do trem testado.

#### 10.1.7 Variação do coeficiente $Cv^2$ .

Os resultados obtidos do termo  $Cv^2$  que dependem do arrasto aerodinâmico são escritos da seguinte forma:

—

Onde:

- $A_f$ : área da seção transversal (Área frontal);
- $C_D$ : Coeficiente de arrasto do ar;

Considerando:  $C_D = C_P + C_I L_T$

- $C_p$ : Coeficiente de arrasto causa da pressão e fricção da parte traseira do trem;
- $C_I$ : Coeficiente de arrasto causa de pressão e fricção ao longo de todo o trem;
- $L_T$ : comprimento do trem

Chega-se à equação:

—

Para o trem convencional de passageiros:

$$A_f \cdot C_D = 8,3 + 0,057 L_T.$$

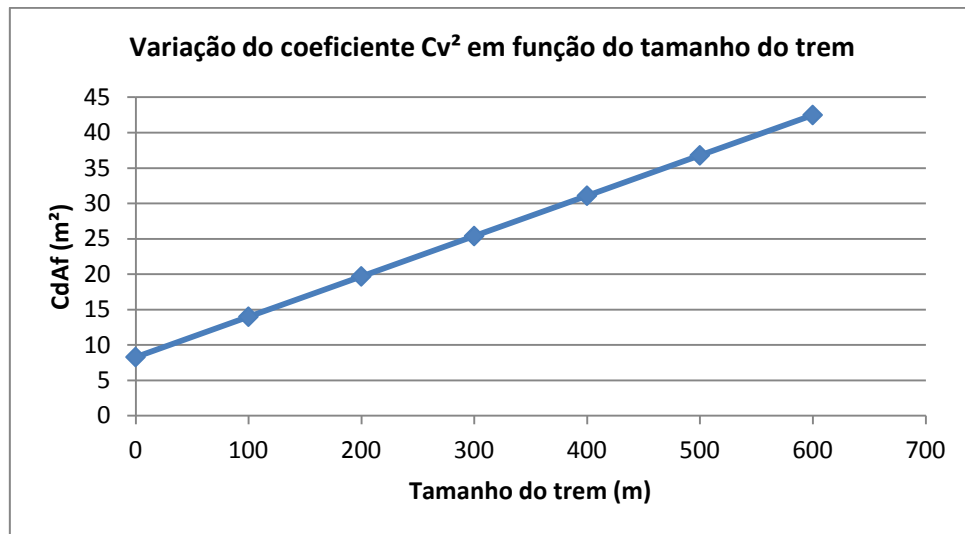


Figura 21 - Gráfico com valores de  $Cv^2$  em função do tamanho do trem

Também é válido lembrar que como o coeficiente  $C$  é um coeficiente que depende exclusivamente o arraste produzido pelo ar no trem, os erros obtidos para este coeficiente são muito baixos, da ordem de 2% do valor correto, e são provenientes principalmente de resquícios de esforços mecânicos que não foram considerados nos outros coeficientes.

## 10.2 Exemplo de Aplicação em projeto de Metrô:

Com o Engenheiro Sergio Uchoa, do grupo Tejofran, obtivemos uma planilha exemplo, em Excel, que foi utilizada para o dimensionamento tanto de motores do trem como para o dimensionamento da rede elétrica do metrô de Fortaleza.

O traçado já estava definido no caso, portanto é um dado de entrada. Outro dado de entrada é a aceleração do trem para cada metro percorrido, com esses dados e equações cinemáticas básicas obtém-se a velocidade (km/s) e o tempo (s) transcorrido para cada trecho de um metro percorrido.

Conhecida a velocidade, pode-se calcular a resistência normal que atua no trem através das fórmulas de Davis:  $A+Bv+Cv^2$ . Além de conhecer a velocidade, tem-se os dados da geometria da via. Porém, pode-se calcular a resistência de curva e rampa.

$$F_{total} = F_{normais} + F_{curva} + F_{rampa}$$

$F_{total}$ : força resistente total atuante (KN)

Fnormal: força normal calculada com a fórmula de Davis (KN)

Fcurva: força da resistência ao movimento em curva (KN)

Frampa: força da resistência ao movimento em rampa (KN)

O modelo não leva em conta a força resistente devido à inércia e aceleração.

Conhecidas as resistências totais atuantes no trem e a aceleração que deve levar, calcula-se o esforço do motor que tem que ser capaz de vencer a somatória das resistências atuantes (forças normais, rampa e curva) e prover ao trem com a aceleração dada. O cálculo será feito da seguinte forma:

$$F = m \cdot a + \sum \text{Resistências}$$

F: força do motor (KN)

m: massa (ton)

a: aceleração do trem ( $\text{m/s}^2$ )

Conhecido o esforço do motor, calculamos facilmente a potência do motor:

$$P_m = F \cdot V_{med}$$

Pm: potência mecânica do motor (KW)

F: força do motor (KN)

Vmed: velocidade média do trem no trecho percorrido.

A potência elétrica pode ser calculada através dos rendimentos do motor, da via e outras perdas.

$$P_e = P_{mecanica} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3,$$

Sendo  $\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$  : fatores corretivos que levam em conta o rendimento do motor. Os valores adotados neste caso foi:  $\eta_1=0,9$  ;  $\eta_2=0,92$  ;  $\eta_3=0,998$ .

Multiplicando-se a potência consumida pelo tempo, obtém-se o trabalho total realizado:

$$W = P_{ot} \cdot t$$

Ou,

$$W = F_{motor} \cdot d$$

A seguir partes da planilha interessantes:

Simulação de Marcha - VOLTA - 6 CARROS														
Espaço	Tempo	Aceleração	Velocid.	Est. Motor	Pot. Mec.	Corr. Elét.	Pot. Elét.	Energ. Cons.	Resistências					
d [m]	t [s]	a [m/s²]	v [km/h]	F [kN]	Pm [kW]	I [A]	Pe [kW]	E [kWh]	rampa [%]	Rr [kN]	raio [m]	Rc [kN]	A	B'V
8885	283,157	-0,750	25,835	-155,301	-1114,492	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,4
8884	283,297	-0,750	25,456	-155,381	-1098,708	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,4
8883	283,439	-0,750	25,071	-155,461	-1082,662	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,4
8882	283,584	-0,750	24,680	-155,542	-1066,340	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8881	283,731	-0,750	24,283	-155,622	-1049,730	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8880	283,881	-0,750	23,880	-155,703	-1032,819	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8879	284,033	-0,750	23,489	-155,784	-1015,590	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8878	284,188	-0,750	23,051	-155,866	-998,026	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8877	284,345	-0,750	22,626	-155,947	-980,114	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8876	284,506	-0,750	22,192	-156,029	-961,828	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8875	284,670	-0,750	21,749	-156,111	-943,149	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8874	284,837	-0,750	21,298	-156,194	-924,054	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3
8873	285,008	-0,750	20,837	-156,276	-904,514	0,000	0,000	1105,884	0	0,000			2,2	0,3

Figura 22 - Planilha de simulação, trecho reto

O trecho anterior é um trecho reto, sem curvas nem rampas, isso é interessante para verificação dos dados que temos, pôde-se observar que dados utilizados por empresas de cálculo são muito semelhantes aos dados que possuímos, chegando a uma resistência normal não mais que 2 vezes maior ou menor.

Simulação de Marcha - VOLTA - 6 CARROS														
Espaço	Tempo	Aceleração	Velocid.	Est. Motor	Pot. Mec.	Corr. Elét.	Pot. Elét.	Energ. Cons.	Resistências					
d [m]	t [s]	a [m/s²]	v [km/h]	F [kN]	Pm [kW]	I [A]	Pe [kW]	E [kWh]	rampa [%]	Rr [kN]	raio [m]	Rc [kN]	A	B'V
8121	408,082	0,500	55,304	123,673	1902,973	787,827	2302,882	1428,721	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8120	408,127	0,500	55,421	123,922	1907,761	789,559	2308,676	1429,382	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8119	408,192	0,500	55,538	123,972	1912,543	771,488	2314,483	1430,005	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8118	408,257	0,500	55,655	124,021	1917,320	773,415	2320,244	1430,649	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8117	408,321	0,500	55,771	124,070	1922,091	775,340	2326,019	1431,296	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8116	408,386	0,500	55,887	124,120	1926,858	777,262	2331,797	1431,943	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8115	408,450	0,500	56,003	124,169	1931,619	779,183	2337,548	1432,593	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8114	408,515	0,500	56,118	124,219	1936,375	781,101	2343,304	1433,243	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8113	408,579	0,500	56,234	124,268	1941,126	783,018	2349,063	1433,896	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8112	408,643	0,500	56,349	124,317	1945,871	784,932	2354,796	1434,550	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8111	408,708	0,500	56,464	124,366	1950,612	786,844	2360,533	1435,206	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8110	408,770	0,500	56,578	124,416	1955,348	788,755	2366,284	1435,863	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8
8109	408,834	0,500	56,693	124,465	1960,078	790,663	2371,988	1436,522	-2,57	-5,481	305,5	3,26	2,2	0,8

Figura 23 - Planilha de simulação, trecho com todos os tipos de resistências

O trecho representado na figura 21 é ilustrativo, apresenta todos os tipos de resistência, já que se trata de um trecho em declive e com um raio de curvatura de 300m. As principais colunas do exemplo são as de esforço motor e potência mecânica. Isso se deve porque são as incógnitas cujo conhecimento é necessário, como será visto a seguir:

As aplicações deste tipo de modelo são as seguintes:

- Quantos motores serão colocados ao longo do trem. Ex: a CPTM coloca um motor por cada dois vagões
- Potencia máxima requerida obtida no presente modelo. Se colocar 2 motores no total, a potencia máxima requerida para cada motor seria da Potencia máxima obtida média.
- Tamanho máximo que pode ter o motor, limitada por a própria geometria do trem com uma largura e comprimentos máximos.

Definidos os 3 campos anteriores pode se escolher o motor comercial mais conveniente.



### **10.3 Aplicações típicas das expressões para a resistência normal em termos de Engenharia Ferroviária:**

Existe uma serie de aplicações para as formulas de Davis, alguns dos exemplos mais frequentes desse uso são os seguintes:

#### **10.3.1 Definição da lotação máxima dos comboios de carga:**

A carga máxima é definida comparando-se o esforço trator da locomotiva, ou das locomotivas, com a somatória das máximas resistências normais e acidentais, para o conjunto trator e os vagões a tracionar, em uma dada via.

#### **10.3.2 Cálculo de distâncias de frenagem:**

Para calcular a distância de frenagem dos trens, considera-se a contribuição da resistência normal, das acidentais, do freio-motor e das frenagens pneumáticas, normal e de emergência. Vale observar que a Segurança na Ferrovia está baseada no chamado “licenciamento por espaço”, em que os trens são distanciados entre si pelos chamados “blocos de sinalização”, materializados por circuitos de via ou por “laços” virtuais criados por software telemático, caso dos sistemas CBTC-Controle de Tráfego por Telecomunicações”. Em qualquer caso, a dimensão de cada bloco deve guardar relação com a distância de frenagem dos trens no local, pois, de outra forma, simplisticamente falando, o trem não conseguiria frear antes de atingir o bloco em que se encontra outro trem.

#### **10.3.3 Dimensionamento definição do “nível” de motorização dos trens.**

Existem algumas características operacionais que os trens devem atender. Trens da CPTM, por exemplo, devem ter capacidade de aceleração de  $1\text{m/s}^2$ , assim deve ser adotado um conjunto motor que forneça o esforço trator necessário para vencer a resistência normal e demais resistências dando ao trem a aceleração necessária. Outra característica, que deve ser considerada na escolha dos motores, é que suas dimensões devem ser compatíveis com o espaço reservado para os mesmos no truque, junto aos eixos-motores.

Em alguns casos específicos, o sistema de alimentação elétrica já existe e não será alterado, assim, os motores devem, além de atender as características operacionais exigidas, não superar a capacidade alimentação da rede.

#### **10.3.4 Modelagem do sistema de alimentação elétrica.**

Estas aplicações derivam da compatibilidade que deve haver entre o esforço trator que o trem desenvolve em cada momento, a potência de seus motores, a corrente que “puxa” da rede a cada momento e o espaçamento entre as subestações elétricas que alimentam a via.

Assim é que, a resistência normal é um dos componentes que os motores do trem devem vencer durante a marcha do trem, sendo que a força necessária para tal, a partir da potência do motor, definirá a corrente na rede aérea e o espaçamento possível entre subestações, função das perdas na rede.

#### **10.3.5 Monitoramento energético:**

Durante a operação dos trens, é necessário o monitoramento do consumo de energia da rede, para localizar possíveis problemas na via ou nos trens. O controle é feito a partir do pré-dimensionamento do consumo energético dos trens na linha, o qual é feito para o projeto da rede.

Os processos de licitação atuais exigem que o consumo dos trens seja estimado e, caso o mesmo seja excedido, o licitante é obrigado a pagar a diferença entre o consumo real e o previsto. Assim, a previsão precisa de consumo ganha grande importância fundamental no processo de projeto.

## **11 CONCLUSÕES**

A malha ferroviária brasileira deve se expandir muito nos próximos anos, para isso necessita-se tecnologia e conhecimento. Um dos mais importantes conhecimentos necessários é o da resistência ao movimento, com o qual é possível realizar o dimensionamento da rede elétrica e o cálculo do consumo de combustível, que vem se tornando cada vez mais importante, de modo que alguns editais de licitações vêm incluindo nos valores os gastos com combustível ao longo da vida útil, se os cálculos forem inferiores aos gastos reais a empresa deve arcar com a diferença.

Com toda a importância que existe no assunto, não há muita bibliografia traduzida para a língua portuguesa, e mesmo em outros idiomas geralmente a fonte de dados é a mesma, da fórmula de Davis. Isso faz com que a bibliografia utilizada seja, em sua maior parte já ultrapassada, muitos dos livros já tem 50 anos e apresentam dados de locomotivas com cargas muito menores que as atuais.

Observou-se uma clara dependência do tipo de pista, como pode ser visto na tabela 32, quando utilizou-se o mesmo trem em trilhos distintos e foram obtidos resultados até 2 vezes maiores nos coeficientes A e B, o coeficiente  $Cv^2$  foi obviamente parecido porque depende exclusivamente do arrasto do ar. Isso mostra que além das diferenças no trem, deve ser estudado o efeito que mudanças na pista fazem sobre as resistências.

Verificamos que a resistência normal é uma parcela importante das resistências do trem, porém em trechos em auge, por exemplo, a resistência devido à rampas é muito superior, sendo que distâncias de sinalização, e de parada devem levar isso em conta.

Posteriormente outros estudos foram realizados, estudos de aplicações possíveis, e como é realizado o modelo para cálculos detalhados, e do modelo quais dados são realmente utilizados, foi estudado um modelo que foi utilizado em cálculos de uma situação real, onde foi possível verificar a compatibilidade com as fórmulas que foram utilizadas no trabalho e as que estão presentes no modelo.

## 12 BIBLIOGRAFIA

- [1]BRINA, Helvécio L. Estradas de Ferro v.2: Tração – Frenagem –Material Rodante – Circulação dos Trens. edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1988. (ISBN: 85-7041-084-4)
- [2]FRANCISCO, M. Tongo. Ferrocarriles. edição. Ciudad de México: Editora Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.,1982. (ISBN: 968-6062-66-1)
- [3] DAVIS, W.J, Jr.: The tractive resistance o electric locomotives and cars, *General Eletric Rewiew*, vol.29, October 1926.
- [4]BRANCO, José Eduardo S. C., FERREIRA, Ronaldo: Tratado de Estradas de Ferro: Material Rodante. edição. Rio de Janeiro: Editora Reflexus Estúdio de Produção Gráfica, 2000. (ISBN: 85-901545-1-3)
- [5] TOLEDO, Edgard D.: Tração Elétrica: Volume 1. edição. São Paulo: Editora Nobel, 1987. (ISBN: 85-213-0481-3)
- [6] LUKASZEWICZ, P. – Energy Consumption and Running Time For Trains. – Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology (Stockholm). (ISSN 1103-470X).

ANEXOS:

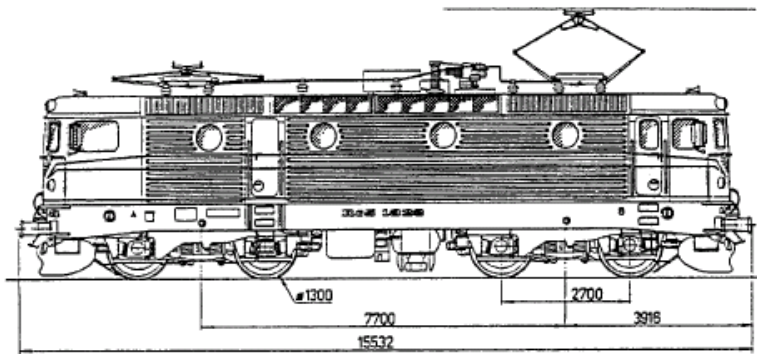


Fig. E - 1 Locomotive: SJ Rc. Length 15.5 m. Mass 79 tonnes.

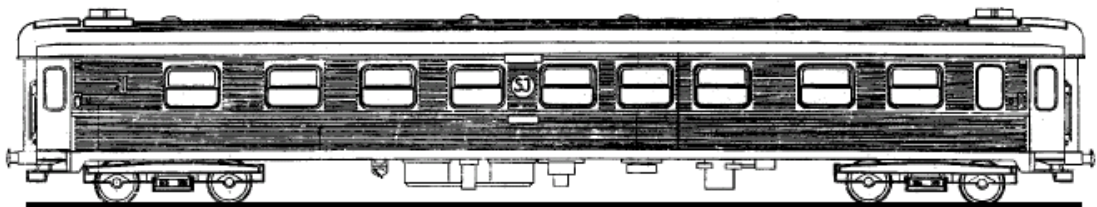


Fig. E - 2 Measuring car: passenger car SJ AB3RT. Length 24.1 m. Mass 45 tonnes.

Figura 24 - Trens utilizados no exemplo de aplicação

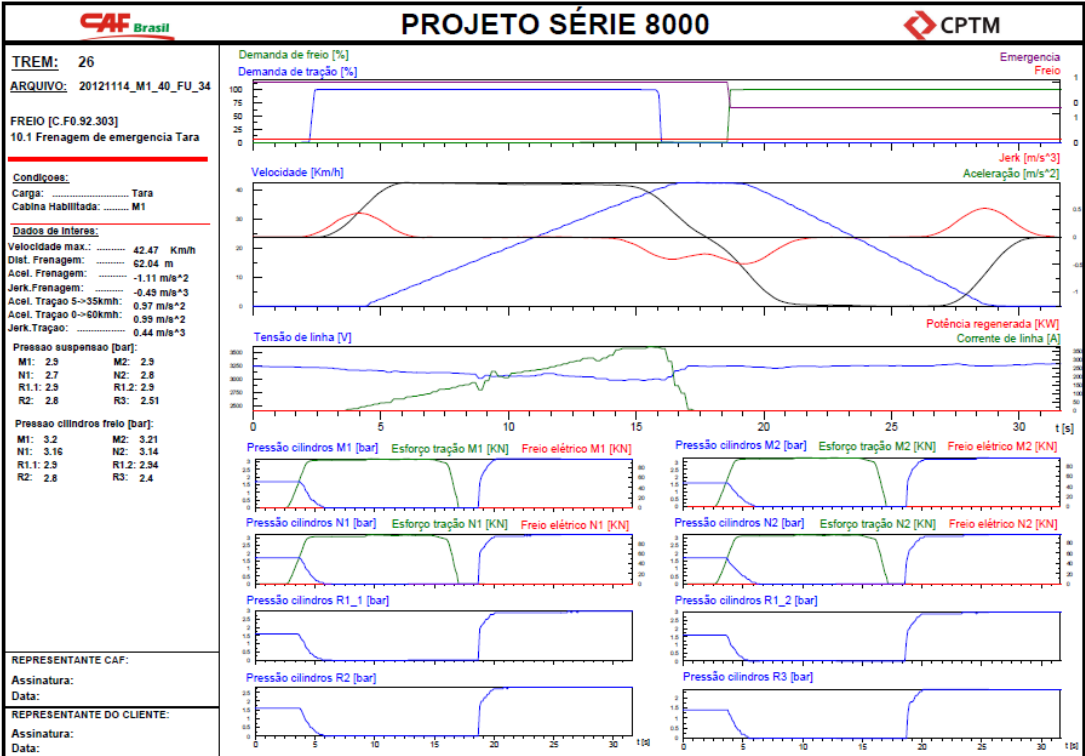


Figura 25 - Teste recebido da CAF

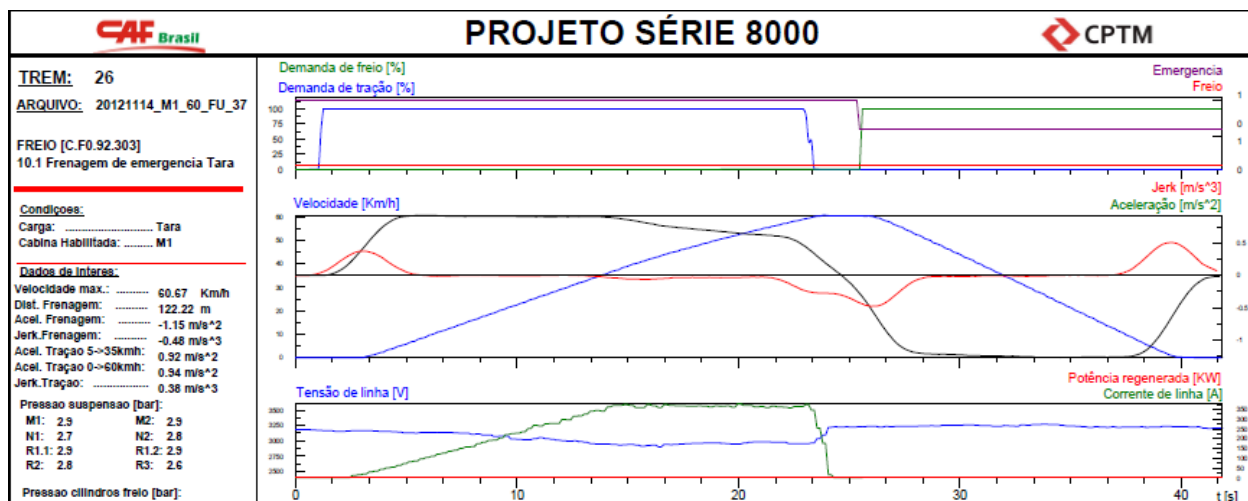


Figura 26 - Teste 2- CAF

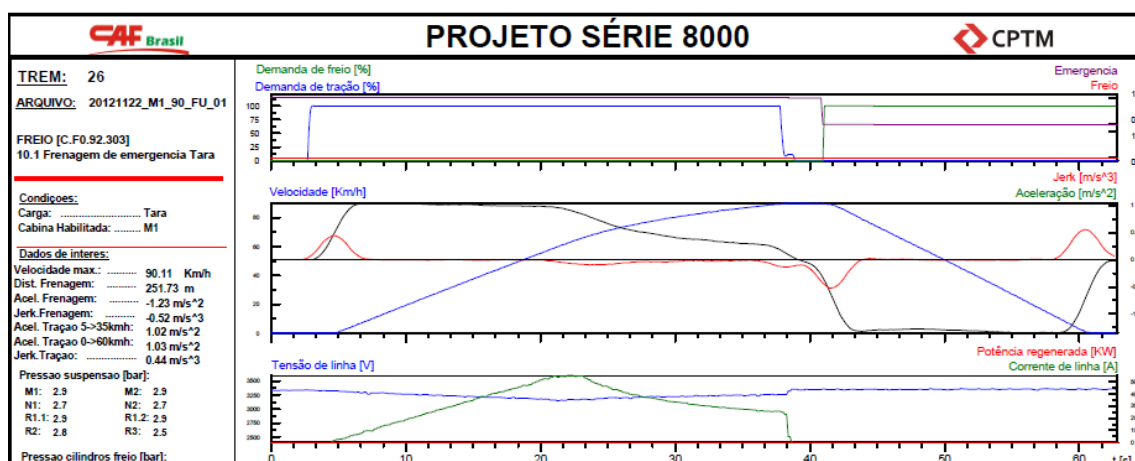


Figura 27 - Teste 3 - CAF