

PROCEDIMENTO EXPEDITO PARA AVALIAÇÃO DO TRAÇADO DE FERROVIAS SOB O ASPECTO DO DESEMPENHO DOS TRENS

Cassiano Augusto Isler

João Alexandre Widmer

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

A reestruturação do sistema ferroviário brasileiro de transporte de cargas produziu um novo cenário que exige a definição de políticas de planejamento que atendam as necessidades futuras desse modo de transporte. Neste artigo propõe-se um método de caracterização de linhas ferroviárias que considera os parâmetros geométricos que afetam a velocidade dos trens na via. Para sua validação são comparadas as velocidades médias de um trem-tipo em um trecho de ferrovia existente, de geometria conhecida, com o desempenho dessa mesma composição em uma via modelada para representar o mesmo trecho.

ABSTRACT

The restructuring of Brazilian's railway cargo transportation system has produced a new scenario that requires the definition of planning policies to meet the future needs of this transport mode. This paper proposes a characterization method of railway lines which considers the geometric parameters that affect the speed of trains on the track. In order to validate the method, the average speeds of a standard train on a real stretch of known geometry are compared to the average speeds of this same train on a modeled railroad that represents the same stretch.

1. INTRODUÇÃO

Após um período de estagnação dos investimentos públicos na construção e operação das ferrovias brasileiras, restritas ao atendimento de regiões específicas como no caso da Estrada de Ferro Carajás e a FERRONORTE S.A., constata-se um crescimento da oferta de transporte de cargas após a concessão da malha ferroviária à iniciativa privada, e conseqüente aumento progressivo da demanda, como pode ser verificado pelos dados apresentados na Pesquisa Ferroviária 2009 da Confederação Nacional dos Transportes, que indica aumento de 95,1% da produção ferroviária entre os anos de 1997 e 2008 (CNT, 2009).

Por outro lado, é necessário atentar-se para o fato de que o crescimento do setor implica na aceleração do desgaste da via permanente e material rodante utilizado na operação do sistema. Desse modo, ao mesmo tempo em que a evolução do transporte ferroviário de cargas é importante para o desenvolvimento do país, são observadas restrições ao aumento da capacidade das ferrovias impostas principalmente pelas condições de conservação da superestrutura ferroviária e características geométricas da via permanente, que refletem nos limites de velocidade dos trens na via (Batista, 2006).

Esse cenário é particularmente afetado pelo modelo dos contratos estabelecidos entre a União – por intermédio do Ministério dos Transportes – e as empresas concessionárias, que têm como principal exigência o cumprimento de metas de desempenho (aumento da produção e redução do índice de acidentes) sem a necessidade de aplicação de investimentos pré-definidos (Ministério dos Transportes, 1997).

Assim, surge a necessidade de estabelecer-se uma política de aplicação de recursos com vistas à melhoria do desempenho atual dos sistemas ferroviários sem que os planos de expansão futuros sejam excessivamente onerados a ponto de tornarem-se inviáveis. Uma política com horizonte de planejamento de médio prazo para atingir esse objetivo consiste na aplicação de investimentos em trechos específicos da malha, identificados como gargalos restritivos ao

aumento da capacidade das ferrovias, cujo tema foi abordado por diversos autores recentemente (Kozan e Burdett, 2005; Abril *et al.*, 2008; Isler, 2010).

Alternativa que também se mostra viável, porém com horizonte de planejamento de longo prazo, e que pode ser realizada em concomitância com a aplicação de recursos para manutenção da via existente, é a construção de uma nova via permanente, com traçado mais adequado às dimensões e pesos por eixo dos veículos ferroviários utilizados atualmente.

Nesse caso, entretanto, é necessário que estudos adequados sejam realizados desde a análise de demanda de potenciais usuários do novo sistema, tipo de carga a ser transportada na ferrovia, desempenho dos veículos ferroviários etc., até a etapa executiva, devido ao nível de investimentos que projetos dessa magnitude exigem.

Nesse contexto, e diante das perspectivas de crescimento do setor na próxima década, propõe-se um método de caracterização de traçados ferroviários para análise prévia da viabilidade de sua implantação do ponto de vista da velocidade dos trens na via. No procedimento apresentado são considerados valores limites para os parâmetros geométricos utilizados na caracterização da via permanente, que afetam diretamente a velocidade média dos trens, como inclinação máxima de rampas e raio mínimo de curvas.

O método proposto tem, ainda, como objetivo secundário permitir estimar o desempenho dos trens em uma linha ferroviária existente, dado que a geometria e o gabarito das ferrovias brasileiras são de difícil acesso ou, em alguns casos, inexistentes.

A sistematização dos cálculos executados com base na formulação matemática apresentada nos itens que se seguem foi efetuada através de rotinas computacionais elaboradas no *Visual Basic for Applications*, inserido no *software Microsoft Office Excel*.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O perfil longitudinal de uma ferrovia afeta diretamente o desempenho dos trens – e consequentemente os seus tempos de viagem – impondo restrições à política de operação do sistema. Assim, apesar de existirem outros fatores que devem ser considerados no processo de definição de um traçado ferroviário, como o tipo de trem que tráfegará na via, as condições socioeconômicas das regiões atendidas etc., a topografia pode ser considerada um dos fatores preponderantes para caracterização de uma ferrovia.

Os Modelos Digitais de Terreno (MDT) foram desenvolvidos para representação do relevo de uma região – e tratamento matemático das informações sobre a altitude – após a sua aquisição através de diferentes métodos, como aerofotogrametria, por exemplo (Miller e Flamme *apud* Matos, 2005). Em relação às ferrovias, esses modelos permitem ao analista realizar inferências sobre o traçado da via do ponto de vista altimétrico.

Tighe e Chamberlain (2009) compararam a precisão de alguns modelos digitais de terreno de domínio público e de acesso restrito existentes atualmente: *Shuttle Radar Topographic Mapping (SRTM)*, *USGS National Elevation Data (NED)*, *Advanced Spaceborne Thermal emission and Reflecion Radiometer (ASTER)* e *NEXTMap*[®] (versão integrada do *NED* e *SRTM*). Os autores comparam os quatro modelos de elevação – em termos de acurácia vertical em diferentes configurações de terreno (plano, ondulado, montanhoso etc.) e cobertura do

solo – e afirmam que a qualidade dos modelos *NEXTMap*[®], *NED* e *SRTM* correspondem às especificações apresentadas pelos seus respectivos autores.

A avaliação da adequação de um traçado ferroviário pode ser feita sob diferentes aspectos (econômico, social etc.), sendo a velocidade média dos trens um dos parâmetros que podem ser utilizados nesse processo. Existem simuladores que representam o movimento dos trens na linha ferroviária através de um modelo computacional e que fornecem informações sobre o seu desempenho no percurso, como velocidade instantânea, consumo de combustível, etc. (Hay, 1982).

Atualmente, diversas ferramentas de simulação permitem representar o movimento dos trens com base nas equações algébricas de equilíbrio de forças que atuam sobre os veículos ferroviários, dentre os quais podem ser citados o *RailPlan*[®] (Martin, 1999), o *ROMAN*[®] (Barber et al., 2007) e o *Train Energy Model – TEM* (Drish, 1992).

3. MÉTODO

O método de caracterização de ferrovias apresentado neste artigo atém-se principalmente aos parâmetros geométricos da via permanente, com início pela definição do traçado da ferrovia, seguido do cálculo do raio das curvas e da declividade das rampas em pontos sucessivos da trajetória escolhida.

3.1. Parâmetros geométricos da via permanente

A caracterização da linha ferroviária tem início com a definição do seu traçado com base nas características da região em que será instalada, relativo aos potenciais polos de oferta e demanda, características topográficas, de ocupação do solo etc.

Devido à disponibilidade de recursos, principalmente financeiros, inerentes à etapa de anteprojeto, a ferrovia pode ser caracterizada por ferramentas computacionais comumente empregadas na análise de sistemas de transportes, como os *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou aqueles de visualização das características topográficas e de uso do solo, como o *Google Earth*.

Os Sistemas de Informações Geográficas, em geral, permitem que sejam analisadas as características de uso do solo – através da visualização de imagens de fotografias aéreas – e o perfil de altitudes da via dado por um MDT. Entretanto, esse processo exige uma grande capacidade de armazenamento e processamento de dados, o que dificulta a definição de um traçado considerando esses dois aspectos concomitantemente.

O *software Google Earth*, por outro lado, possibilita a análise simultânea do perfil topográfico do terreno e das características de uso e ocupação do solo sem a necessidade de armazenamento dessas informações. Devido a isso, e pela sua gratuidade, o método estabelece a criação de uma linha que representa a projeção horizontal da ferrovia através desse *software*.

Apesar de ser pouco recomendado para utilização em estudos que requerem alta precisão, constatou-se que essa ferramenta mostra-se adequada para as análises que se pretende apresentar neste artigo, dado que esse fator não apresenta influência expressiva sobre o desempenho dos trens, como será demonstrado posteriormente. Esse *software* permite, além da definição do traçado de uma nova ferrovia, a caracterização de uma linha ferroviária

existente, uma vez que na resolução em que é disponibilizado é possível visualizar a linha férrea já implantada.

3.1.1. Caracterização planimétrica

Uma vez realizado o procedimento de criação da linha contínua que define o traçado da ferrovia no *software Google Earth*, o vetor que a representa é exportado para um *software* em ambiente *CAD (Computer Aided Design)*, no qual é discretizada pela inserção de pontos igualmente espaçados sobre a linha ferroviária. A Figura 1 ilustra um trecho ferroviário discretizado após definição da trajetória do trem.

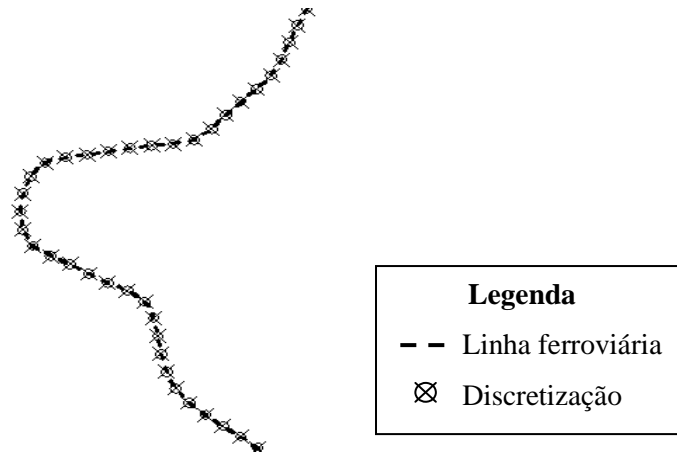


Figura 1: Discretização do traçado georeferenciado da ferrovia.

Como a linha definida está contida em um arquivo georeferenciado, os pontos resultantes de sua discretização possuem coordenadas geográficas conhecidas que podem ser transferidas para uma planilha eletrônica. Após essa operação, é possível calcular o raio da curva, a rampa e a posição acumulada dos pontos sucessivos da trajetória.

Para o cálculo desses parâmetros, uma rotina computacional analisa três pontos consecutivos por vez, sendo que para cada análise são extraídas as coordenadas geográficas do ponto central (i) e as dos pontos a montante ($i-1$) e a jusante ($i+1$), tal como caracterizado na Figura 2.

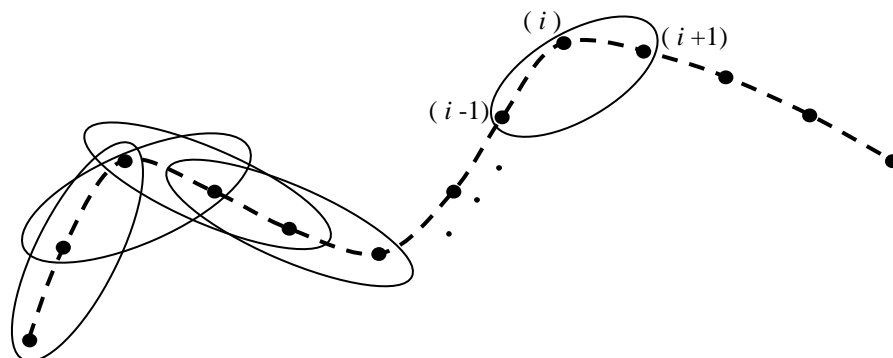


Figura 2: Análise dos parâmetros da via permanente através de pontos sucessivos.

O raio de curva em cada ponto da trajetória é calculado com aproximação para uma curva circular, com base nos elementos geométricos de uma circunferência que passa por três pontos consecutivos de coordenadas conhecidas, como ilustrado na Figura 3.

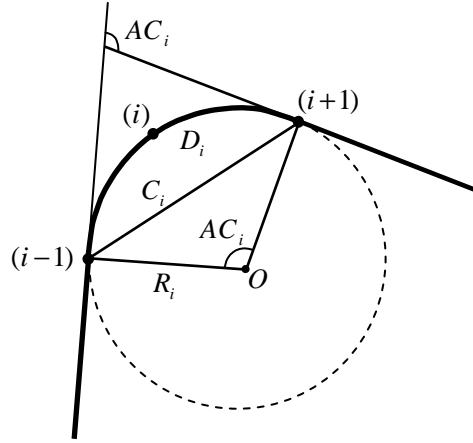


Figura 3: Curva circular (sem transição) inscrita em uma circunferência.

Assim, o raio da curva com centro na origem O e que passa pelo ponto (i) é dado algebricamente pela Equação 1.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} \quad (1)$$

Como a curva de raio R_i passa pelos pontos $(i-1)$ e $(i+1)$ tem-se, analogamente, a Equação 2 e Equação 3.

$$R_i = \sqrt{(x_{i-1} - x_o)^2 + (y_{i-1} - y_o)^2} \quad (2)$$

$$R_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_o)^2 + (y_{i+1} - y_o)^2} \quad (3)$$

A partir disso, é possível obter o sistema de equações não-lineares indicado a seguir, constituído pela igualdade entre a Equação 1 e a Equação 2 e Equação 3.

$$\sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} = \sqrt{(x_{i-1} - x_o)^2 + (y_{i-1} - y_o)^2} \quad (4)$$

$$\sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} = \sqrt{(x_{i+1} - x_o)^2 + (y_{i+1} - y_o)^2} \quad (5)$$

O desenvolvimento algébrico da Equação 4 resulta na seguinte igualdade:

$$x_o \cdot (x_{i-1} - x_i) + y_o \cdot (y_{i-1} - y_i) = \frac{x_{i-1}^2 + y_{i-1}^2 - x_i^2 - y_i^2}{2} \quad (6)$$

Analogamente, a Equação 5 resulta em:

$$x_o \cdot (x_i - x_{i+1}) + y_o \cdot (y_i - y_{i+1}) = \frac{x_i^2 + y_i^2 - x_{i+1}^2 - y_{i+1}^2}{2} \quad (7)$$

Resolvendo o sistema formado pela Equação 6 e Equação 7 nas incógnitas x_o e y_o , relativas às coordenadas do centro da circunferência que passa pelos pontos $(i-1)$, (i) e $(i+1)$, é possível obter os valores numéricos destes parâmetros, tal que:

$$y_o = \left\{ \left[\frac{x_{i-1}^2 + y_{i-1}^2 - x_i^2 - y_i^2}{2 \cdot (x_{i-1} - x_i)} \right] - \left[\frac{x_i^2 + y_i^2 - x_{i+1}^2 - y_{i+1}^2}{2 \cdot (x_i - x_{i+1})} \right] \right\} / \left[\left(\frac{y_{i-1} - y_i}{x_{i-1} - x_i} \right) - \left(\frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right) \right] \quad (8)$$

$$x_o = \left[\frac{x_{i-1}^2 + y_{i-1}^2 - x_i^2 - y_i^2}{2 \cdot (x_{i-1} - x_i)} \right] - \left(\frac{y_{i-1} - y_i}{x_{i-1} - x_i} \right) \cdot y_o \quad (9)$$

A inserção dos valores desses parâmetros na Equação 1 viabiliza a obtenção do valor do raio da circunferência que passa pelo ponto (i) . Assim, é possível caracterizar a curva circular segundo o seu ângulo central (em graus decimais) que, geometricamente, é dado

pelo parâmetro AC_i na Figura 3. Algebricamente, esse parâmetro é calculado segundo a Equação 10.

$$AC_i = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{C_i}{2 \cdot R_i}\right) \quad (10)$$

em que AC_i = ângulo central (ou grau) da curva em graus decimais;

R_i = raio da circunferência no ponto (i), em metros;

$C_i = \sqrt{(x_{i-1} - x_{i+1})^2 + (y_{i-1} - y_{i+1})^2}$ = corda relativa ao ponto (i), em metros, equivalente à distância entre os pontos ($i-1$) e ($i+1$) de coordenadas conhecidas.

Caracterizada a curva circular em cada um dos pontos da ferrovia, é possível obter a posição acumulada destes em relação ao início da trajetória, definida pela Equação 11.

$$S_i = S_{i-1} + \frac{D_i}{2} \quad (11)$$

em que S_i = posição do ponto (i) na trajetória.

S_{i-1} = posição do ponto à montante do ponto (i), tal que $S_0 = 0$.

$D_i = R_i \cdot AC_i$ = desenvolvimento, referente ao comprimento do arco entre os pontos ($i-1$) e ($i+1$), indicado na Figura 3.

3.1.2. Caracterização altimétrica

O relevo do terreno na área de implantação de uma ferrovia é de difícil obtenção pelo fato de que apenas o levantamento das características topográficas do local com equipamentos adequados de levantamento topográfico permitem fazer inferências precisas sobre esse parâmetro. Esse nível de detalhamento, entretanto, exige a aplicação de recursos financeiros e de tempo que geralmente não são compatíveis com o nível detalhamento exigido na etapa de anteprojeto.

Diante dessas condições, o procedimento apresentado propõe a utilização de um modelo digital de terreno elaborado através do projeto denominado *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, comandado pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (*NGA – National Geospatial-Intelligence Agency*) e Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (*National Aeronautics and Space Administration – NASA*) dos Estados Unidos da América (Farr *et al.*, 2007).

O objetivo do projeto *SRTM* foi de realizar um levantamento altimétrico em escala global de modo a gerar uma base de dados sobre a topografia terrestre, através de um equipamento que sobrevoou a atmosfera do planeta durante 11 dias do mês de fevereiro do ano 2000. As informações coletadas são de domínio público e podem ser adquiridas em dois formatos distintos: arquivo com extensão relacionada a um Sistema de Informação Geográfica ou planilha acessada através de um editor de texto.

Como pode ser observado na Figura 4, a superfície terrestre foi dividida em 72 fusos com 5 graus de longitude e 24 fusos com 5 graus de latitude, sendo então possível selecionar a quadrícula que contém a localidade cuja altitude se deseja conhecer.

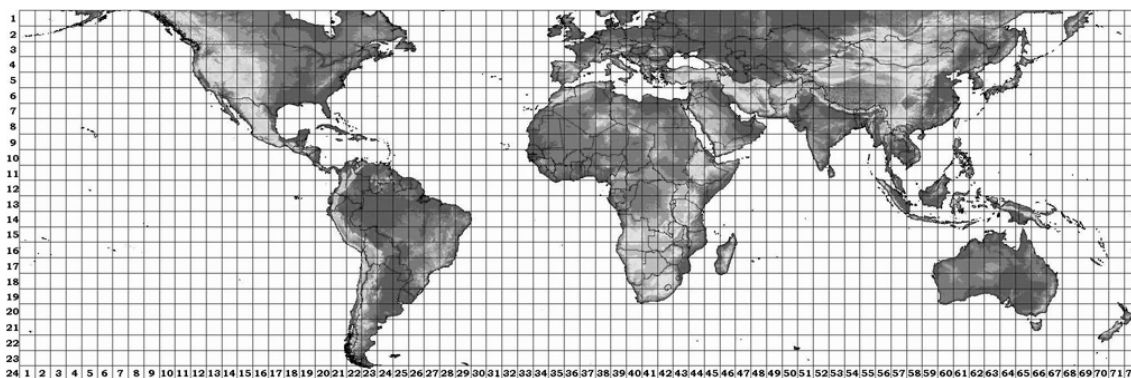


Figura 4: Divisão da superfície terrestre definida no projeto *SRTM*. Fonte: www2.jpl.nasa.gov/srtm

Cada quadrícula representada na Figura 4 contém 36 milhões de pontos dispostos em uma matriz quadrada de 6000 linhas por 6000 colunas, cada qual com uma altitude correspondente, espaçadas entre si com uma distância de 3 segundos de arcos ($8,33 \times 10^{-4}$ graus decimais ou aproximadamente 90 metros).

Farr *et al.* (2007) apresentam o desenvolvimento matemático para o tratamento dos erros horizontais e verticais decorrentes das imprecisões associadas ao levantamento realizado pelo projeto *SRTM*. Apesar de os erros planialtimétricos observados na América do Sul serem expressivos (Tabela 1), as informações do *SRTM* foram utilizadas pelo fato de que o método apresentado neste artigo pretende apresentar parâmetros iniciais para caracterização de ferrovias, sendo necessário um maior detalhamento do terreno no caso de análises mais avançadas.

Tabela 1: Erros horizontais e verticais do projeto *SRTM* na América do Sul (90-percentil).

Tipo	Erro (metros)
Erro de posição geográfica	9,0
Erro absoluto de altitude	6,2
Erro relativo de altitude	5,5
Erro de altitude de ondas de grande comprimento	4,9

Fonte: Farr *et al.* (2007), pág 37 – adaptado

Após definição do tipo de arquivo a ser adquirido (SIG ou planilha), o usuário é direcionado para uma seção que contém a descrição da quadrícula selecionada e o seu esquema gráfico, exemplificado no conjunto de ilustrações da Figura 5.

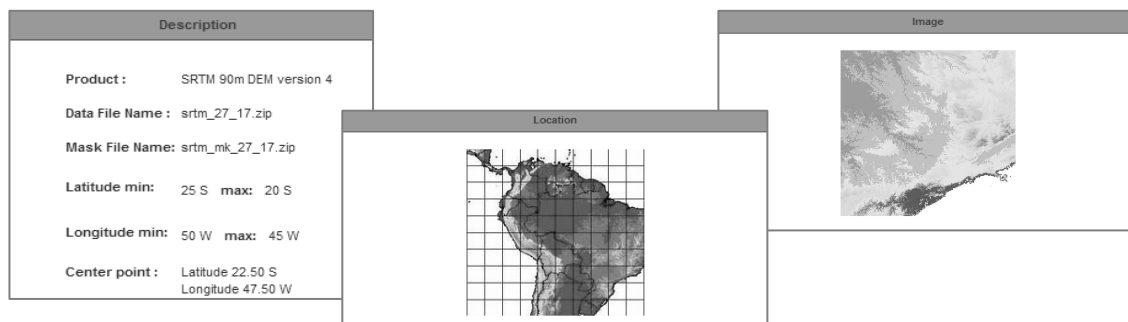


Figura 5: Detalhamento de uma quadrícula definida no projeto *SRTM*. Fonte: www2.jpl.nasa.gov/srtm

A partir da aquisição dos arquivos que contêm as altitudes (formato de planilha), os valores das elevações dos pontos resultantes da discretização do traçado ferroviário são calculados com base nas suas coordenadas geográficas através de interpolação linear. Com isso, é possível calcular as rampas nesses locais utilizando o mesmo procedimento de pontos sucessivos descrito para a caracterização das curvas circulares horizontais.

A Figura 6 representa esquematicamente a definição da inclinação da rampa em um ponto qualquer da trajetória do trem, calculada algebricamente segundo a Equação 12.

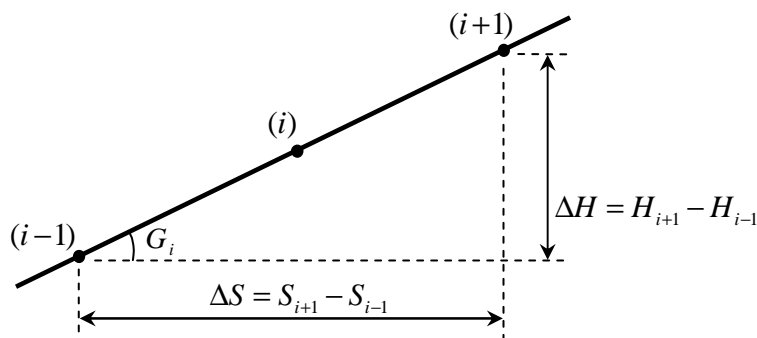


Figura 6: Esquema para cálculo da inclinação da rampa na ferrovia.

$$G_i = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{S_{i+1} - S_{i-1}} \quad (12)$$

em que G_i = rampa no ponto (i) da trajetória;

S_{i-1} = posição do ponto a montante do ponto (i) ;

S_{i+1} = posição do ponto a jusante do ponto (i) ;

H_{i-1} = altitude do ponto a montante do ponto (i) ;

H_{i+1} = altitude do ponto a jusante do ponto (i) .

3.2. Limites para os parâmetros geométricos

Existem valores limites para o raio das curvas horizontais com vistas a reduzir a resistência de curva imposta pelo atrito entre as rodas dos veículos ferroviários e o boleto do trilho. A recomendação de AREMA (2009) é que o ângulo central de curvas horizontais de linhas ferroviárias não seja maior que 12° .

No caso de um novo traçado, a existência de curvas com ângulo central maior que esse valor de referência impõe que correções sejam realizadas na etapa de definição da linha que caracteriza a ferrovia, o que acarreta na necessidade de nova execução do procedimento de cálculo do ângulo central das curvas estabelecido no item 3.1.1. Desse modo, o processo de correção das curvas deve ser realizado de modo iterativo até que todos os pontos do traçado respeitem a condição de contorno estabelecida em relação ao ângulo central máximo recomendado para as curvas horizontais.

Como citado anteriormente, a inclinação das rampas em uma ferrovia também é um fator que exerce influência sobre a velocidade dos trens na via. No caso das rampas ascendentes, a resistência ao movimento é diretamente proporcional à inclinação da rampa no ponto

observado e, no caso dos declives, a restrição ao movimento dá-se pelos limites de velocidade operacional e de frenagem do trem.

AREMA (2009) recomenda que a declividade máxima das rampas em uma ferrovia não seja maior que 2%, exceto em casos específicos cuja necessidade seja justificada pela impossibilidade de correção das características do terreno. Hay (1982) apresenta uma comparação entre o número de trens necessários para transportar uma determinada quantidade de material em função da declividade do terreno da inclinação da rampa (Tabela 2).

Tabela 2: Trens necessários para movimentar 80.000 toneladas de carga em função da declividade*.

Declividade (%)	Carga por trem (toneladas)	Número de trens necessários	Carga transportada por trem	
			Relativa à declividade 0%	Relativa à declividade precedente
0	54.760	1,40	-	-
0,5	11.702	6,78	-79%	-
1	6.514	12,28	-88%	-9%
1,5	4.455	17,95	-92%	-4%
2	3.358	23,80	-94%	-2%
2,5	2.677	29,90	-95%	-1%

*Usando duas locomotivas de 120 toneladas cada e vagões com capacidade de 128 toneladas, com velocidade de 12 mph, aprox. 19 km/h. **Fonte:** Hay (1982), pág 201 –adaptado

A Tabela 2 mostra que a maior redução na carga transportada ocorre na mudança de declividade de um trecho plano para uma rampa com declividade de 0.5%, e nas rampas sucessivas observa-se uma alteração dos valores, porém menos expressivas em relação à rampa de 0%. Portanto, aliada à recomendação de AREMA (2009), pode-se estabelecer como limite de rampas um valor máximo no intervalo de 1,5% a 2%.

Devido à possível variação expressiva das altitudes entre pontos sucessivos da ferrovia modelada – obtidos a partir do *SRTM* – as rampas calculadas pela Equação 12 podem resultar em valores maiores que os limites indicados. Isso exige a correção das altitudes (Equação 13) para que a circulação dos trens seja viável, o que na prática corresponde à movimentação de solo na etapa de implantação da ferrovia.

$$H_{i+1} = G_i^* \cdot (S_{i+1} - S_{i-1}) + H_{i-1} \quad (13)$$

em que G_i^* = mínimo entre G_i obtido na Equação 12 e a declividade máxima (valor entre 1,5% e 2%, definido *a priori*).

3.3. Limites de velocidade operacional

As considerações apresentadas até este item trataram dos elementos relativos às características geométricas da via permanente ferroviária cuja abordagem determinística permite o emprego de modelos e equações que apresentam soluções exatas – ou aproximadas – que podem ser sistematizados através de procedimentos computacionais.

Existem, entretanto, alguns fatores que afetam localmente a velocidade dos veículos ferroviários, uns associados ao projeto original da via e outros decorrentes da política de uso e

manutenção da via permanente. Os potenciais redutores da velocidade dos trens associados ao projeto original da via são as condições estruturais – pontes, viadutos, túneis – que requerem limites para os carregamentos e as condições operacionais nos desvios e passagens em nível.

Por outro lado, o uso contínuo dos equipamentos ferroviários impõe desgastes que necessitam de reparos sistemáticos, os quais, invariavelmente, não são suficientes para reconstituir as condições iniciais de operação da ferrovia, o que exige o estabelecimento de limites de velocidades aos trens nos trechos que apresentam riscos à segurança do tráfego.

Devido à variabilidade e particularidade de cada traçado em relação à existência de pontes, viadutos, túneis, desvios, passagens em nível e das condições de conservação da superestrutura ferroviária, os limites de velocidade estabelecidos por esses fatores não são considerados na abordagem apresentada neste artigo.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO

A proposta de validação do método baseia-se na comparação da velocidade média de um trem-tipo padrão que percorre o trecho da ferrovia em linha singela entre as estações de Santa Fé do Sul e Araraquara no Estado de São Paulo.

Inicialmente foi definido no *software Google Earth* a linha que caracteriza esse trecho ferroviário. Em seguida, foi feita a sua transferência para um *software* em plataforma *CAD* no qual foi discretizada com pontos sucessivos equidistantes de 100 metros, cujas coordenadas foram utilizadas para cálculo do raio das curvas, obtenção das altitudes e determinação da inclinação das rampas, estas restritas ao intervalo [-1,5%; 1,5%].

Nessas condições, foram construídos os arquivos de caracterização da via real e da modelada adequados à execução do simulador de desempenho de trens denominado *Train Energy Model* (Drish, 1992). O modelo não contempla um tratamento específico dos casos em que os valores das inclinações das rampas da via real excedem os limites estabelecidos, de modo que nesses trechos as diferenças de velocidade em relação à via modelada podem ser expressivamente maiores.

O trem empregado na determinação da velocidade média foi configurado com uma locomotiva principal do tipo DASH9, com massa de 160 toneladas, uma locomotiva auxiliar do tipo U20, com 108 toneladas – para os trechos que necessitam de força tratora adicional – e 45 vagões do tipo HOOPER, cada qual carregado com 100 toneladas (Batista, 2006).

Nas simulações não são estabelecidas paradas intermediárias entre as estações de origem e destino, pois a análise proposta visa avaliar o desempenho dos trens sob o aspecto do traçado da ferrovia e não do ponto de vista operacional. Além disso, foi definido o valor de 70 km/h para os limites de velocidade dos trens nas simulações, a partir de estudos realizados anteriormente (Batista, 2006).

As simulações apresentam informações sobre o movimento do trem (velocidade e posição instantânea, consumo de combustível, força de tração disponibilizada pelas locomotivas etc.) em intervalos de tempo pré-fixados com base nas equações básicas e de resistência ao movimento do trem vinculadas a um modelo computacional. Assim, procedeu-se à simulação do movimento do trem-tipo no sentido Santa Fé do Sul-Araraquara e Araraquara-Santa Fé do

Sul, com os valores reais dos parâmetros de rampas, curvas e limite de velocidade e com os dados obtidos pelo método expedito proposto.

Para comparação do desempenho dos trens nas simulações calculou-se a velocidade média entre pontos sucessivos da linha espaçados igualmente de uma distância de 100 metros, em ambos os sentidos de movimento dos trens (Santa fé do Sul-Araraquara/Araraquara-Santa Fé do Sul). A velocidade média no i -ésimo ponto da ferrovia é dada pela Equação 14.

$$v_{i,jk} = \frac{S_{ijk} - S_{i-1,jk}}{t_{ijk} - t_{i-1,jk}} \left[\frac{\text{metros}}{\text{minutos}} \right] = \frac{100}{t_{ijk} - t_{i-1,jk}} \left[\frac{\text{metros}}{\text{minutos}} \right] = \frac{6}{t_{ijk} - t_{i-1,jk}} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (14)$$

em que $v_{i,jk}$ = velocidade média no trecho entre o $(i-1)$ -ésimo e i -ésimo ponto;

t_{ijk} = tempo acumulado no i -ésimo ponto;

$t_{i-1,jk}$ = tempo acumulado no $(i-1)$ -ésimo ponto.

com $j = \begin{cases} 1, \text{ para os parâmetros reais da via} \\ 2, \text{ para os parâmetros modelados da via} \end{cases}$

$k = \begin{cases} 1, \text{ para o sentido Santa Fé do Sul – Araraquara} \\ 2, \text{ para o sentido Araraquara – Santa Fé do Sul} \end{cases}$

A comparação entre as velocidades dos trens em relação aos respectivos sentidos de circulação foi estabelecida segundo a Equação 15.

$$\varepsilon_{ik} = \frac{v_{i1k} - v_{i2k}}{v_{i1k}} \cdot 100 (\%) \quad (15)$$

O histograma da Figura 7 mostra a distribuição de frequência dos erros percentuais entre as velocidades médias nos pontos sucessivos da ferrovia, em ambos os sentidos. O valor médio dos erros obtidos foi de $-0,35\%$ com desvio padrão de $4,05\%$.

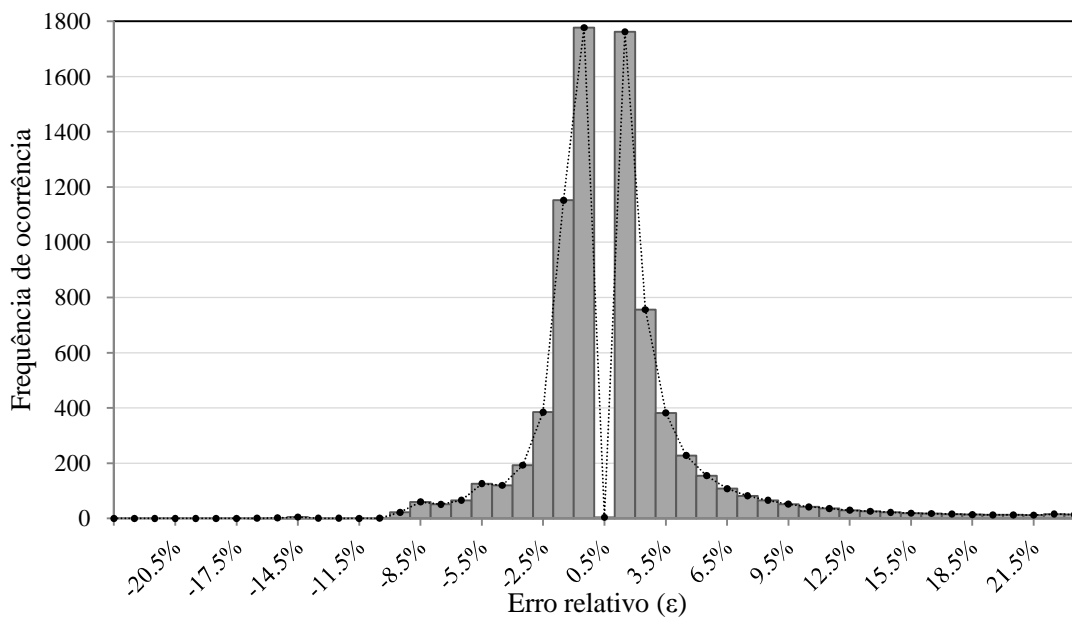


Figura 7: Histograma dos erros percentuais das velocidades médias a cada 100 metros.

5. CONCLUSÕES

Os dados resultantes das simulações do movimento dos trens na via real e com os parâmetros obtidos pelo método exposto neste artigo indicam que o procedimento de caracterização da via permanente pode ser utilizado como primeira aproximação para análise do traçado de ferrovias do ponto de vista do desempenho dos veículos ferroviários, quanto à velocidade média dos trens na via.

Desse modo, é possível utilizar as informações sobre o desempenho dos trens em traçados distintos que fazem parte do processo de escolha entre alternativas à implantação de uma ferrovia. Por outro lado, o método proposto pode ser utilizado também para a representação, ainda que aproximada, dos parâmetros geométricos de ferrovias existentes, dado que em muitos casos essas informações não estão disponíveis junto aos órgãos públicos e empresas concessionárias (e.g. ANTT, DNIT, ALL etc.).

Devido à aderência dos resultados do modelo em termos de velocidade, sugere-se uma investigação complementar de aplicabilidade do método em termos de estimativa de custos de terraplenagem em anteprojetos de novos traçados de vias permanentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril, M.; F. Barber; L. Ingolotti; M. A. Salido; P. Tormos e A. Lova (2008) An Assessment of Railway Capacity. *Transportation Research Part E*, v. 44E, n. 5, p. 774–806.
- AREMA (2009) *Manual for Railway Engineering*. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Lanham, MD.
- Barber, F; M. Abril; M. A. Salido; L. P. Ingolotti; P. Tomos e A. Lova (2007) Survey of automated Systems for Railway Management. *Technical Report DSIC-II/01/07*, Department of Computer Systems and Computation, Technical University of Valencia.
- Batista, C. N. O. (2006) *Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil*. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- CNT (2009) *Pesquisa CNT de Ferrovias 2009*. Confederação Nacional de Transportes, Brasília, DF.
- Drish, W. F. (1992) AAR Report SD-39 Supplement – Train Energy Model version 2.0 user’s manual (version 2.5 supplement). *AAR Research and Test Department – Technical Center*, Chicago, Illinois.
- Farr, T. G.; P. A. Rosen; E. Caro; R. Crippen; R. Duren; S. Hensley; M. Kobrick; M. Paller; E. Rodriguez; L. Roth; D. Seal; S. Shaffer; J. Shimada; J. Umland; M. Werner; M. Oskin; D. Burbank e D. Alsdorf (2007) The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, v. 45, p. 1-33.
- Hay, W. W. (1982) *Railroad Engineering* (2nd ed.). John Wiley, New York.
- Isler, C. A. (2010) *Proposta de um modelo de capacidade de processamento de trens cargueiros em redes ferroviárias de linha singela*. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Kozan, E. e R. Burdett (2005) A railway capacity determination model and rail access charging methodologies. *Transportation Planning and Technology*, v. 28, n.1, p. 27-45.
- Martin, P. (1999) *Train performance and simulation*. Proceedings of 1999 Winter Simulation Conference. Phoenix, AZ, p. 1287-1294.
- Matos, A. C. O. C. (2005) *Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul*. Tese, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Ministério dos Transportes (1997) *Contrato de concessão para a exploração e desenvolvimento do serviço público de transporte ferroviário de carga na Malha Sul*, Brasília, DF.
- Tighe, M. L. e D. Chamberlain (2009) Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP® USA Digital Terrain Model over several USA study sites. *Proceedings of ASPRS/MAPPS 2009 Fall Conference*, San Antonio, TX, p. 16-19.

Cassiano Augusto Isler (cassiano.isler@usp.br)

João Alexandre Widmer (widmer@sc.usp.br)

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – São Carlos, SP, Brasil