

AValiação de Impactos do Excesso de Peso no Transporte Rodoviário de Cargas

Verônica Ghisolfi

Glaydston Mattos Ribeiro

Rômulo Dante Orrico Filho

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia – COPPE

Gisele de Lorena Diniz Chaves

Universidade Federal do Espírito Santo

Departamento de Engenharias e Tecnologia – DETEC

Ivone Catarina Simões Hoffmann

Leonel Antônio da Rocha Teixeira Júnior

Leonardo Roberto Perim

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT

Coordenação Geral de Planejamento e Programação de Investimentos – CGPLAN

RESUMO

O sobrepeso no transporte rodoviário de cargas causa as más condições das rodovias brasileiras, diminui a vida útil do pavimento e aumenta o risco de acidentes. Este é o caso do transporte de rochas ornamentais da cidade de Nova Venécia, Espírito Santo, com destino ao Porto de Vitória. O objetivo desse trabalho é avaliar a relação entre práticas de carregamento com excesso de peso no transporte rodoviário e os custos associados às suas externalidades negativas, por meio da simulação em Dinâmica de Sistemas. O modelo avalia o impacto sobre custos de transporte, manutenção do pavimento e acidentes rodoviários. Os resultados confirmam a redução dos custos operacionais de transporte com o excesso de peso, no entanto, os custos sociais com manutenção do pavimento e acidentes rodoviários são elevados. Dessa forma, a melhor prática de carregamento dos veículos depende da importância relativa entre os custos econômicos e sociais envolvidos.

ABSTRACT

Overweight in road freight transport causes bad conditions on Brazilian highways, decreases pavement life and increases the risk of accidents. This is the case of the transportation of ornamental stones from the city of Nova Venécia, Espírito Santo, to the Port of Vitória. The objective of this study is to evaluate the relationship between overweight loading practices in road transport and the costs associated with its negative externalities through simulation in Systems Dynamics. The model assesses the impact on transportation costs, pavement maintenance and road accidents. The results confirm the reduction of transport costs with excess weight, however, the social costs with pavement maintenance and road accidents are high. Thus, the best vehicle loading practice depends on the relative importance of the economic and social costs involved.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento sustentável de uma nação depende de sistemas de transporte eficientes. Vários autores evidenciaram a relação positiva entre o desenvolvimento econômico de um país e sua infraestrutura de transportes como Diaz *et al.* (2016), Fiorello *et al.* (2010), Hong *et al.* (2011), Ozbay *et al.* (2007) e Weisbrod (2008). Lakshmanan (2011) mostrou que o investimento público em infraestrutura de transportes provoca um efeito positivo sobre o desempenho econômico de longo prazo.

No entanto, se por um lado, a ampla oferta de infraestrutura de transportes é benéfica para o desenvolvimento econômico, por outro, o aumento da demanda por viagens produziu os congestionamentos, poluição e acidentes, cujos custos sociais são distribuídos de forma desigual sobre a sociedade. As políticas do transporte de cargas, especificamente, impactam as esferas econômica, social e ambiental de um país (Schade e Schade, 2005). O crescimento econômico nacional depende da atividade de transporte de carga e sua infraestrutura permite e

dá apoio ao crescimento econômico (Diaz *et al.*, 2016). Em relação às esferas social e ambiental, porém, vários impactos podem ocorrer devido ao desenvolvimento da infraestrutura e de operações de transporte de mercadorias, devendo ser considerados no planejamento estratégico desse setor (PwC, 2009).

Um dos principais problemas do transporte rodoviário de cargas é o sobrepeso dos veículos que causa as más condições das estradas brasileiras, a redução da vida útil dos veículos, o aumento do consumo de combustível, além do maior risco de acidentes. As consequências de tais problemas são percebidas pela degradação da infraestrutura rodoviária em termos de pavimentação, pelo elevado custo operacional do transporte e a diminuição da qualidade do serviço prestado. Além disso, o sobrepeso foi identificado como uma das principais causas de acidentes envolvendo caminhões no Brasil, segundo estudo realizado por Blower e Woodrooffe (2012).

O Brasil, apesar de toda regulamentação legal existente, ainda possui um número elevado de veículos que trafegam com excesso de peso. Em uma pesquisa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, verificou-se que 77% dos veículos transportadores trafegavam com sobrepeso e que 10% de excesso de peso por eixo podem reduzir a vida útil prevista de um pavimento em até 40% (DNIT, 2006b).

Por outro lado, os instrumentos para a quantificação dos impactos de externalidades causadas pelo transporte não são satisfatórios, com controvérsias sobre a relação entre o transporte e seus impactos, bem como sobre o cálculo dos custos associados (Castro, 2013). Litman (2009) apresenta os impactos econômicos do transporte em diferentes categorias, dentre os quais, destaca-se os custos operacionais das rodovias (gastos com energia, mão-de-obra), os custos dos danos à infraestrutura (custos de manutenção rodoviária), os custos de congestionamentos e de escassez (custos de atrasos impostos aos usuários resultantes do congestionamento do tráfego), os custos ambientais (poluição sonora, da água, do solo e do ar) e os custos de acidentes (em termos de danos materiais e perdas de produto).

Assim, diante do problema de mensurar o impacto do excesso de peso no transporte de cargas, que afeta a infraestrutura rodoviária, a segurança e o consumo adicional de recursos para manter a trafegabilidade na rede de transporte, o objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre o excesso de peso no transporte rodoviário de cargas e os custos associados às suas externalidades negativas, mais especificamente os custos operacionais de transporte e os custos sociais com acidentes rodoviários e manutenção do pavimento, por meio de um modelo de Dinâmica de Sistemas (DS).

Bazzan (2014) afirma que os sistemas de transporte são sistemas complexos e, por isso, o poder público e/ou privado tem necessidade de testar, em ambientes de simulação, as políticas e ações antes que elas sejam efetivamente implementadas no mundo real, aberto e dinâmico. Um modelo de simulação dinâmica é capaz de fornecer uma visão global do sistema, incorporando questões relativas ao problema do sobrepeso no transporte rodoviário e seus impactos provocados em outros setores, como os custos econômicos e sociais. Para mais detalhes sobre o método DS, diagrama de causa e efeito, diagrama de estoque e fluxo e testes dos modelos, verificar Forrester e Senge (1980), Karnopp *et al.* (2012), Lobontiu (2017), Morecroft (2015), Nabavi *et al.* (2017), Sterman (2000), Zagonel e Corbet (2006). No entanto, algumas lacunas

na literatura existente foram identificadas, tais como um modelo mais próximo das condições reais de operação de rodovias brasileiras, com diversidade no volume e categorias veiculares.

No Brasil, o transporte de rochas ornamentais no estado do Espírito Santo, realizado pelo modo rodoviário, apresenta o problema de excesso de peso, causando danos que, muitas vezes, não são contabilizados ou considerados para as decisões estratégicas do setor. Por isso, tomou-se este objeto como estudo de caso para a elaboração de um modelo de simulação em DS que contemple as características necessárias, cujo objetivo é auxiliar na elaboração de políticas mais eficazes para a sustentabilidade da atividade transportadora.

2. MODELO PROPOSTO

Considerando-se o sobrepeso dos veículos de carga, propõem-se um modelo de simulação dos impactos sobre custos operacionais de transporte e custos sociais com manutenção do pavimento e acidentes rodoviários, utilizando-se um estudo de caso do transporte de rochas ornamentais no Espírito Santo. O modelo considerou as características relativas à realidade brasileira, em que as rodovias são utilizadas por diversas categorias veiculares e todas impactam de forma significativa no tempo de viagem, na condição do pavimento e nos custos operacionais das rotas utilizadas.

Pertencente à região Sudeste, o Espírito Santo, apresentado na Figura 1 destaca-se no cenário nacional de rochas ornamentais por conter a maior reserva de mármore do país e uma grande reserva de granito (Castro *et al.*, 2011). Como cerca de 70% de todo o granito exportado pelo Espírito Santo é proveniente da região noroeste do estado (Menezes e Sampaio, 2012), delimitou-se como objeto de estudo, o transporte de rochas ornamentais com origem em Nova Venécia e destino, o Porto de Vitória. O acesso ao polo produtivo da cidade de Nova Venécia pode ser feito por duas principais rotas rodoviárias, por onde é realizado o escoamento da produção de rochas ornamentais até o Porto de Vitória, conforme Figura 1.

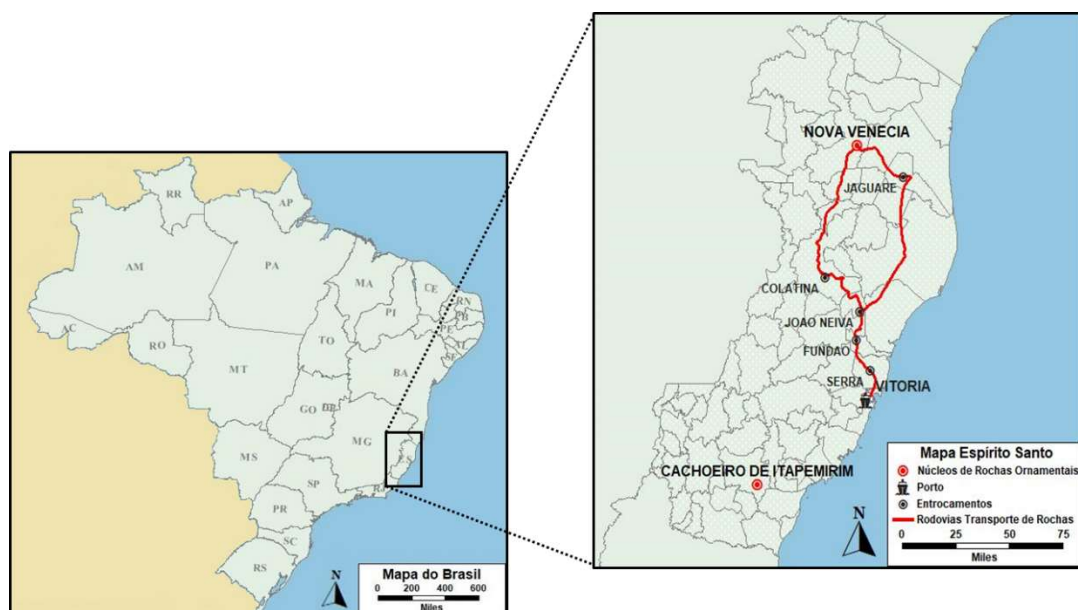


Figura 1: Mapa do Brasil e do Espírito Santo com destaque aos principais núcleos da indústria de rochas ornamentais capixaba e o porto de Vitória.

No entanto, os trechos que compõem cada rota possuem características específicas que precisam ser consideradas, como o Volume Médio Diário Anual (VMDA) e a capacidade viária, conforme apontado pelo DNIT (2006a), pois as diferentes categorias veiculares e volume de tráfego que utilizam as rodovias impactam de forma significativa sobre a condição do pavimento, o tempo de viagem e o custo operacional de trafegar por tais rotas.

Para a caracterização do VMDA, o DNIT retomou, em 2014, o Plano Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT, que identifica o comportamento do tráfego nas rodovias federais pavimentadas, por meio de um plano sistematizado de contagem de tráfego com contadores permanentes, pesquisas de Contagem Volumétrica e Classificatória e pesquisas de Origem e Destino, para as coletas das informações dos fluxos de veículos nas rodovias federais (DNIT, 2017a). Dessa forma, as rotas de escoamento de rochas ornamentais em estudo foram segregadas em trechos de acordo com a homogeneidade do volume de tráfego.

A Rota #1 não possui fiscalização por pesagem com balanças fixas, o que facilita a prática do sobre peso pelos veículos de carga. No entanto, tais veículos que trafegam pela Rota #1 podem, eventualmente, serem fiscalizados por balanças móveis sob operação do DNIT. Além disso, a Rota #1 também não possui cobrança de pedágio, o que influencia a escolha dos usuários por tal rota. A Rota #2 possui uma balança fixa de pesagem posicionada no sentido do fluxo analisado, ou seja, no sentido norte – sul.

Na Rota #3 há outra balança fixa, posicionada no sentido contrário ao do fluxo analisado e, portanto, não fiscaliza o fluxo de veículos no sentido de análise desse trabalho. A responsabilidade pela fiscalização e operação das balanças fixas nessas rotas são da Agência Nacional de Transportes Terrestres, já que a BR-101 no estado encontra-se sob concessão. No entanto, a ação fiscalizadora nessas balanças fixas está sujeita à programação e disponibilidade de fiscais da citada agência no estado, ou seja, não operam de forma contínua. Além disso, as Rotas #2 e #3 possuem cobrança de pedágio.

As variáveis do modelo foram agrupadas em seis módulos inter-relacionados, como mostra o diagrama de causa e efeito na Figura 2. Cada módulo do modelo foi estruturado em diagramas de estoque e fluxo e simulado no software Vensim PLE, um software livre da empresa Ventana Systems (Ventana Systems, 2018) destinado ao uso pessoal e educacional.

O primeiro módulo refere-se à “Previsão do Volume de Carga”. Neste módulo, as viagens são ocasionadas pela produção de rochas ornamentais e as viagens são realizadas apenas pelo modo rodoviário. A partir do volume previsto de carga a ser transportado, existem duas rotas disponíveis para o escoamento da mesma, denominadas Rota #1 e Rota #2. O objetivo deste módulo é, portanto, calcular o volume de carga, em toneladas, que será escoada por cada rota considerada.

O segundo módulo refere-se ao “Tempo de Viagem”, cujo objetivo é fornecer o tempo de viagem em cada rota rodoviária. Devido às diferenças características de cada trecho, o tempo de viagem difere para cada rota. Na Rota #1, o carregamento dos veículos está em função do limite legal de peso e do sobre peso praticado pelos transportadores. Na Rota #2, o carregamento dos veículos respeita o limite de peso estabelecido legalmente. Assim, dado o carregamento dos veículos em função da prática adotada e o volume de rochas ornamentais a ser transportada,

obtem-se o tráfego de veículos de rochas, que será somado ao tráfego de outras categorias veiculares.

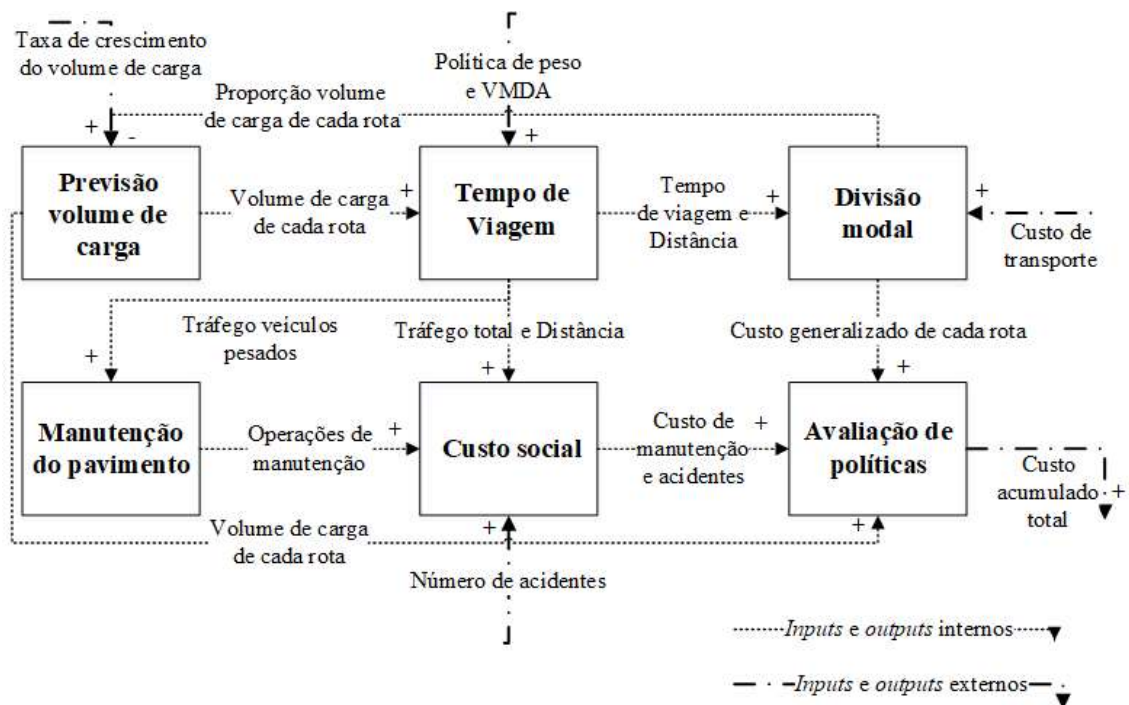


Figura 2: Diagrama de causa e efeito para o excesso de peso no transporte rodoviário.
 Fonte: Elaborado com base em Liu e Mu (2015).

A partir do volume total de veículos, necessita-se convertê-lo para a unidade de carro de passeio, definido pelo Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2010). Para o cálculo da capacidade rodoviária, o HCM (TRB, 2010) também fornece os fatores de ajuste relativos à rodovia de pista simples. Após obtido o carregamento de toda a rede, é feita uma análise de cada link rodoviário com o objetivo de determinar a relação entre volume e capacidade, dividindo-se o volume de tráfego equivalente pela capacidade média do trecho. De posse dessa relação, aplica-se a Equação (1), determinada pelo Bureau of Public Roads – BPR (1964), para a obtenção do tempo de viagem dispendido no trecho rodoviário em análise.

$$t = t_0 x (1 + \alpha x \left(\frac{V}{C}\right)^\beta) \quad (1)$$

em que t : tempo ajustado para o qual o volume V pode utilizar o *link* rodoviário;

t_0 : tempo de viagem para a condição de fluxo livre; e

α e β : parâmetros de calibração.

O tempo de fluxo livre é calculado pela extensão do trecho considerado em quilômetros e pela velocidade de operação. Já a distância total percorrida em cada rota é obtida somando-se as distâncias de cada trecho.

O módulo “Divisão Modal”, utiliza o tempo de viagem e a distância, além do custo operacional de transporte em função da distância e do tempo para cada condição do pavimento, cujo objetivo é calcular a proporção do volume de carga a ser transportada por cada rota. Nesse módulo, a escolha modal refere-se à escolha da rota a ser utilizada entre apenas uma origem e um destino

pré-definidos. A escolha entre as rotas pode ser determinada pela função logit multinomial empregada para o modelo de divisão modal (Ortúzar e Willumsen, 2001). Dessa forma, a proporção do volume de carga transportada pela Rota #1 é dada pela Equação (2).

$$\text{Proporção volume de carga rota \#1} = \frac{e^{c_1}}{e^{c_1} + e^{c_2}} \quad (2)$$

em que c_1 : custo generalizado da Rota #1; e
 c_2 : custo generalizado da Rota #2.

O custo generalizado é dependente do tipo de veículo e das condições físicas e operacionais da rodovia, sendo composto por parcelas que variam com a distância percorrida, com o tempo de percurso e com os custos fixos, como o pedágio (MTPA e COPPE, 2016). Ressalta-se que para a Rota #3, não se aplica a divisão modal, pois todos os veículos provenientes das duas rotas anteriores deverão utilizar a Rota #3. Assim, o custo generalizado da Rota #3 é somado aos custos generalizados das Rotas #1 e #2.

No módulo “Manutenção do Pavimento”, as operações de manutenção podem ser do tipo corretiva ou restaurativa e suas aplicações variam de acordo com o Índice de Condição do Pavimento (ICP). A degradação acelerada e a redução da vida útil do pavimento são provocadas pelo excesso de peso por eixo. Por isso, foi necessário caracterizar a composição veicular do tráfego de veículos pesados, com base em Pesquisas de Contagem de Tráfego do PNCT (DNIT, 2017a) das rotas em estudo.

A primeira condição para a manutenção é o nível da qualidade atual do pavimento, ou seja, se o ICP atual é maior do que o limite para a realização da manutenção corretiva, não se necessita de nenhuma intervenção no pavimento naquele instante de tempo. A segunda condição para a solicitação de intervenções é não ter nenhuma operação de manutenção em andamento. Por fim, a solicitação de intervenções de manutenção deve respeitar o intervalo de tempo no qual não se faz avaliações da condição do pavimento, pois, o levantamento do ICP nas rodovias brasileiras não é feito todo ano. Considerando-se as três condições, se o ICP estiver entre os limites para manutenção restaurativa e corretiva (DNIT, 2006b), faz-se a manutenção corretiva. Se o ICP estiver abaixo do limite para manutenção restaurativa, faz-se esse tipo de manutenção.

O quinto módulo apresenta o “Custo Social do Transporte de Carga”, que se subdivide em custos com manutenção do pavimento e custos com acidentes de tráfego. O Custo de manutenção do pavimento é calculado em função do tipo de intervenção a ser realizada, e dos custos de cada tipo de manutenção (DNIT, 2017b), multiplicado pelo percentual de veículos de rochas em relação ao total de veículos pesados. Os custos com manutenção corretiva e restaurativa são definidos em função do custo por quilômetro, da distância da rota e da taxa de crescimento do custo (IBGE, 2017).

A segunda parte do módulo “Custo Social do Transporte de Carga” refere-se aos custos com acidentes rodoviários. Existem três tipos de gravidade dos acidentes rodoviários: acidente com óbito; acidente com vítima; e acidente sem vítima. Dessa forma, os custos com acidentes de tráfego nas três rotas são calculados em função do percentual de cada tipo de acidente (PRF, 2017), previsão do número total de acidentes e custo para cada tipo de acidente envolvido (IPEA, 2015), além da taxa de crescimento do custo (IBGE, 2017). A previsão de acidentes é definida em função do VMDA e da distância percorrida, de acordo com o modelo de previsão

de acidentes proposto pelo Highway Safety Manual User Guide – HSM (TRB, 2014). O VMDA de interesse refere-se aos veículos de rochas ornamentais.

Por fim, o sexto módulo, “Avaliação de Práticas”, recebe os custos de manutenção rodoviária e de acidentes, denominados custos sociais, além do custo generalizado de cada rota, denominado custo econômico, para calcular o custo acumulado total e simular cenários com pesos de importância aos custos (econômicos e sociais), em função de diferentes práticas de carregamento dos veículos de carga, em percentual de sobrepeso. Dessa forma, pode-se avaliar o impacto sobre o custo total do sistema quando se varia o percentual do excesso de peso no carregamento dos veículos de carga, bem como pela variação da importância de cada tipo de custo para os tomadores de decisão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cenários propostos analisam os impactos frente a diferentes práticas de carregamento que envolvem o excesso de peso. No Cenário 1 simulou-se três práticas de carregamento considerando uma variação de zero a 100% de sobrepeso: Prática 1 (não admite sobrepeso); Prática 2 (admite até 50% de sobrepeso); e Prática 3 (admite entre 50% e 100% de sobrepeso), pois, apesar da legislação existente, dados das balanças móveis confirmam a prática do excesso de peso nos veículos de rochas ornamentais. O Cenário 2 simulou a variação do Percentual de sobrecarga dos veículos e a variação da importância do custo social de forma concomitante, de modo a avaliar a melhor prática de carregamento dos veículos sob diferentes cenários de importância dos custos sociais em relação aos custos econômicos, com base na minimização dos custos totais do sistema.

3.1 Práticas de carregamento dos veículos de rochas ornamentais

Na Prática 1, considera-se que o excesso de peso, tanto no PBT quanto nos eixos, é nulo, ou seja, os limites legais de peso seriam respeitados pelos transportadores de carga. Neste caso, os custos são apresentados na Figura 3.

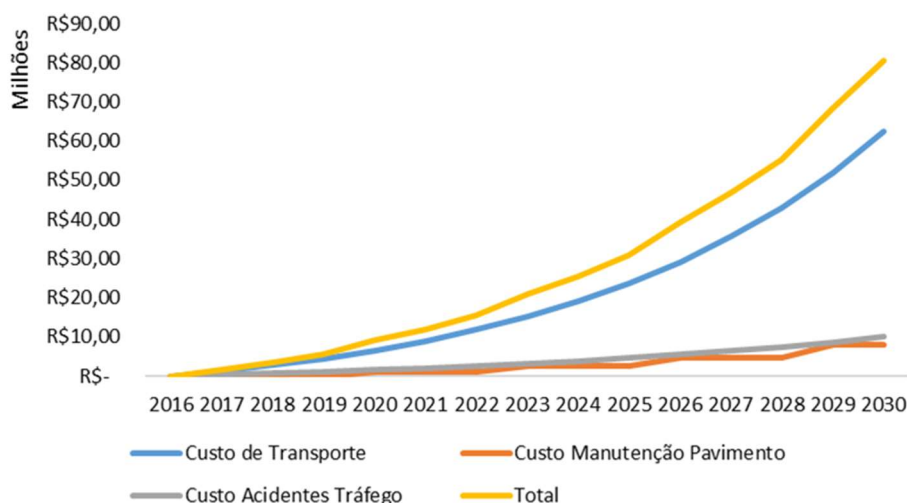


Figura 3: Custos econômicos, sociais e total acumulados no cenário Prática 1.

A imposição legal sobre os limites de peso aumenta o custo econômico de transporte, uma vez que esse custo é dividido pelo volume de carga transportada, eliminando-se a economia de escala obtida com o excesso de peso. Já os custos sociais com manutenção e acidentes são

reduzidos em relação a um Cenário de Referência, baseado em dados do sobrepeso praticado atualmente, obtidos das balanças móveis localizadas nas rotas do estudo de caso, como mostra a Figura 4.

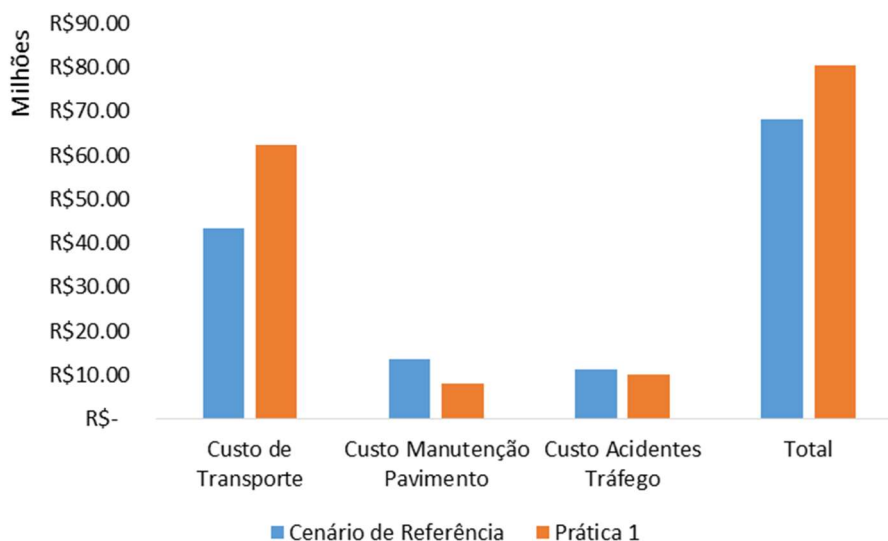


Figura 4: Comparação dos custos no Cenário de Referência e Prática 1.

O custo econômico de transporte aumenta 45%, os custos com manutenção e com acidentes de tráfego reduzem 41% e 12%, respectivamente, e o custo total sofre um aumento de 18%. Assim, pode-se dizer que a Prática 1 causa prejuízo para o sistema como um todo, tendo em vista o aumento do custo total. Entretanto, mais estudos deveriam ser realizados a fim de se avaliar o número de acidentes ocasionados exclusivamente pelos veículos do transporte de rochas ornamentais, tendo em vista que o número de acidentes no modelo é estimado pelo percentual do volume de tais veículos e o número total de acidentes da rodovia, sem distinção do tipo de veículo envolvido. Além disso, ressalta-se a necessidade de atribuir a devida importância a cada tipo de custo para a decisão do melhor cenário.

Na Prática 2, o percentual de excesso de peso varia de 10 a 50% e na Prática 3, varia de 60 a 100%, incrementado gradualmente, de 10% em 10%, para avaliação do comportamento de cada custo separadamente e o custo total do sistema, como apresentado na Tabela 1. Os custos apresentados referem-se ao custo acumulado no final do período de simulação, entre 2016 e 2030. Observa-se que, à medida que o percentual de excesso de peso aumenta, o custo econômico de transporte é reduzido, confirmando a economia de escala obtida por tais práticas de carregamento. O custo mínimo de transporte ocorre sob um percentual de 100% de excesso de peso, destacado em negrito.

Já os custos sociais mínimos ocorrem sob um percentual de 10% de excesso de peso (mas são ainda menores sob a Prática 1) e aumentam com o incremento do sobrepeso. Cabe ressaltar que os custos avaliados são relacionados ao percentual de veículos transportadores de rochas ornamentais, obtido de pesquisas origem destino da Pesquisa Nacional de Tráfego (DNIT, 2017a), realizadas em postos localizados nas rotas apresentadas no estudo de caso. Desta forma, tem-se o impacto de uma categoria veicular específica sobre os custos analisados.

Tabela 1: Comparação dos custos nos cenários Práticas 2 e 3 (R\$).

Cenário	Excesso de peso	Custo de Transporte	Custo Manutenção Pavimento	Custo Acidente Tráfego	Total
Prática 2	10%	58.908.980,00	8.105.233,00	10.682.519,00	77.696.732,00
	20%	54.648.836,00	8.884.721,00	11.053.576,00	74.587.133,00
	30%	50.911.264,00	8.942.155,00	11.199.539,00	71.052.958,00
	40%	47.685.272,00	9.024.282,00	11.260.134,00	67.969.688,00
	50%	44.843.116,00	9.033.064,00	11.287.587,00	65.163.767,00
Prática 3	60%	42.407.408,00	9.035.846,00	11.301.690,00	62.744.944,00
	70%	40.273.284,00	11.143.123,00	11.309.238,00	62.725.645,00
	80%	38.381.336,00	15.715.177,00	11.313.623,00	65.410.136,00
	90%	36.611.484,00	15.711.889,00	11.316.477,00	63.639.850,00
	100%	35.018.720,00	15.706.810,00	11.318.336,00	62.043.866,00

A variação nos custos sociais não é tão significativa quanto a redução do custo operacional de transporte. No caso do custo de manutenção do pavimento, isso ocorre porque existem fatores limitantes para a realização de obras de manutenção, como os limites de condição do pavimento, definidos pelo DNIT (2006b) em função de índices como o índice de rugosidade internacional – IRI, intervalos de tempo entre os levantamentos de tais condições, que foi simulado entre dois e cinco anos, além do tempo de realização das obras, ou seja, o custo de manutenção aumenta dentro desses limites e não apenas em função do excesso de peso praticado.

Portanto, apesar da condição do pavimento reduzir com o sobrepeso praticado pelo transporte de rochas ornamentais, o excesso peso de até 60% exclusivamente nesses veículos não provocaria aumento significativo no custo de manutenção, tendo em vista os fatores limitantes apresentados e considerando o estudo de caso em que apenas os veículos de rochas ornamentais trafegam com excesso de peso, pois o sobrepeso dos demais veículos de carga que trafegam pela rodovia não foi avaliado neste trabalho. Já no caso dos acidentes, são necessários estudos mais aprofundados sobre a ocorrência destes e a causa relacionada exclusivamente ao excesso de peso dos veículos de rochas ornamentais.

A redução no custo total do sistema pode chegar a 23% entre a Prática 1 e a Prática 3, no entanto, os gestores devem levar em consideração a importância de cada custo para a sociedade. Portanto, o próximo cenário avalia os custos com base tanto na variação do excesso de peso, quanto na importância dos custos sociais em relação ao custo operacional de transporte.

3.2 Avaliação da melhor prática de carregamento

A importância relativa do custo social em relação ao custo econômico deve ser considerada pelos gestores como critério de avaliação das melhores práticas a serem adotadas, com base na minimização dos custos totais. A Tabela 2 apresenta os custos totais do sistema, considerando-se a importância do custo social, em que este varia de 0 (sem importância) a 100 (extrema importância) para cada prática de carregamento.

Os resultados da Tabela 2 mostram que, para o caso em que os custos sociais têm importância menor do que o custo econômico ou estes são igualmente importantes, a melhor alternativa é a sobrecarga de 100% nos veículos para a redução do custo total do sistema. Para uma importância relativa dos custos sociais de 60 a 80%, os custos totais são mínimos sob um percentual de 60% de excesso de peso nos veículos de carga. Apenas no cenário em que os custos sociais são de extrema importância em comparação ao custo de transporte, o custo total mínimo é identificado na Prática 1, em que os limites legais de peso são cumpridos.

Tabela 2: Custo acumulado total sob variação do percentual de sobrepeso e importância do custo social em relação ao custo econômico (R\$ milhões).

Importância do custo social	Peso do custo Social	Sem Importância		Pouco Importante		Igualmente Importante	Muito Importante		Extrema Importância			
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Prática 1	0%	62.4	58.0	53.6	49.1	44.7	40.2	35.8	31.4	26.9	22.5	18.0
	10%	58.9	54.9	50.8	46.9	42.8	38.9	34.8	30.8	26.8	22.8	18.8
	20%	54.6	51.2	47.7	44.2	40.7	37.3	33.8	30.4	26.9	23.4	19.9
Prática 2	30%	50.9	47.8	44.8	41.7	38.6	35.5	32.5	29.4	26.3	23.2	20.1
	40%	47.6	44.9	42.2	39.5	36.7	34.0	31.2	28.5	25.8	23.0	20.3
	50%	44.8	42.4	39.9	37.5	35.0	32.6	30.1	27.7	25.2	22.8	20.3
Prática 3	60%	42.4	40.2	38.0	35.8	33.6	31.4	29.2	27.0	24.8	22.5	20.3
	70%	40.3	38.5	36.7	34.9	33.1	31.4	29.6	27.8	26.0	24.2	22.5
	80%	38.4	37.3	36.1	35.0	33.8	32.7	31.6	30.4	29.3	28.2	27.0
	90%	36.6	35.7	34.7	33.7	32.8	31.8	30.9	29.9	28.9	28.0	27.0
	100%	35.0	34.2	33.4	32.6	31.8	31.0	30.2	29.4	28.6	27.8	27.0

Cabe aos gestores responsáveis a imposição da devida importância de cada categoria de custo analisada. No entanto, tendo em vista que a deterioração do pavimento dos segmentos da rodovia em análise afeta a infraestrutura logística do país e a competitividade da produção nacional e, os custos com acidentes devem ser nulos em um cenário ideal, acredita-se que os custos sociais deveriam ser considerados de extrema importância para os interesses da sociedade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um modelo de simulação que permite avaliar a relação entre o excesso de peso no transporte rodoviário de rochas ornamentais e os custos associados às suas externalidades negativas relacionadas aos custos operacionais de transporte e aos custos sociais com acidentes rodoviários e manutenção do pavimento. Além disso, atribuiu-se pesos para os custos econômicos e sociais para avaliação das melhores práticas em cada caso.

Os resultados confirmam a redução no custo unitário de transporte e o aumento nos custos sociais com a prática de excesso de peso. Dessa forma existe um *trade-off* entre a redução do custo econômico e dos custos sociais, devendo-se medir tais custos pela respectiva importância atribuída. O excesso de peso por eixo aumenta a produtividade e os lucros da indústria do transporte, mas por outro lado gera ônus para a sociedade, como a rápida deterioração dos pavimentos, aumento de gastos na manutenção viária, além da insegurança nas viagens, causada pelo aumento no índice de acidentes. A deterioração das estradas brasileiras tem impacto direto no custo logístico e, conseqüentemente, na competitividade dos produtos nacionais frente à economia globalizada. Além disso, a falta de infraestrutura ou a baixa qualidade da infraestrutura existente desmotiva a atração de novos investimentos.

Com relação aos acidentes rodoviários, utilizam-se apenas os custos mensuráveis, ou seja, os custos com acidentes utilizados no trabalho estão subestimados, já que não é possível computar o custo da perda de vidas, por exemplo. Além disso, existem outros custos associados às externalidades negativas que não foram mensurados no trabalho, como os custos indiretos

relacionados ao tempo de atraso das viagens nas ocasiões em que as rodovias são bloqueadas por motivos de acidentes, além dos prejuízos pessoais dos diversos usuários das rodovias. Outros custos não mensurados no trabalho são referentes aos impactos ambientais quando esses acidentes envolvem veículos com cargas perigosas, colocando em risco a integridade ambiental do ecossistema em torno do evento ocorrido. Portanto, os impactos sociais deveriam ser melhor estudados e mensurados para uma avaliação mais precisa dos custos reais envolvidos.

Para o cenário em que os custos sociais são considerados de extrema importância, os resultados mostram que se deve adotar a Prática 1 de carregamento dos veículos, em que o limite legal de peso é respeitado. No entanto, identificou-se uma tolerância cada vez maior admitida legalmente no Brasil em relação ao peso transmitido por eixo, o que contribui para a deterioração acelerada do pavimento e a outros danos associados. Ainda assim, as infrações por excesso de peso são frequentes nas rodovias nacionais. Por isso, ressalta-se a importância de políticas mais eficazes como fiscalização ininterrupta, conscientização dos motoristas sobre os riscos envolvidos, declaração obrigatória do peso da carga na nota fiscal e multas mais rigorosas.

Nesse contexto, esse trabalho contribui para a literatura de modo a complementar o conhecimento difundido, para o planejamento estratégico e tomada de decisão no que se refere à formulação e implementação de políticas que regulamentam o sistema de transporte rodoviário de cargas brasileiro, auxiliando no entendimento do comportamento do sistema, na quantificação dos custos envolvidos com base no percentual do excesso de peso praticado, mas, principalmente, na importância dada a cada categoria de custo para a sociedade.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi parcialmente apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo 311664/2015-6 e Processo 307835/2017-0). Esse suporte é gratamente reconhecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bazzan, A. L. C. (2014) Testando o Efeito de Políticas na Área de Mobilidade Urbana através de Modelagem Baseada em Agentes: Projeto LabTrans. In: D'Agosto, M. A. et al. (eds.) *Transportes em Perspectiva: Uma Contribuição dos Pesquisadores Brasileiros para o Futuro dos Transportes*. Ed. ANPET, Rio de Janeiro.
- Blower, D. e J. Woodrooffe (2012) Survey of the status of truck safety: Brazil, China, Australia, and The United States. Transportation Research Institute, The University of Michigan, Michigan: UMTRI.
- Bureau of Public Roads – BPR (1964) Traffic Assignment Manual. Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington, DC.
- Castro, N. (2013) Mensuração de externalidades do transporte de carga brasileiro. *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 1, p. 163-181.
- Castro, N. F.; D. B. Marcon; L. C. Freire; E. F. Lima e P. F. Almeida (2011) Impacto do APL de Rochas Ornamentais do Espírito Santo nas Comunidades. In: Fernandes, F. R. C.; M. A. R. S. Enríquez e R. C. J. Alaminio (eds.) *Recursos Minerais & Sustentabilidade Territorial: arranjos produtivos locais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006a) Manual de Estudos de Tráfego. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 723, Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006b) Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2. ed., Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2017a) Nota Técnica Nº 002/2017/DE. Detalhamento Técnico-científico da primeira versão da metodologia estabelecida para estimativa de volume médio diário anual – VMDA em toda a malha rodoviária pavimentada federal. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2017b) Custos Médios Gerenciais. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custo-medio-gerencial/ANEXOIXCUSTOMDIOGERENCIALNOVEMBRO2016.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2017.
- Diaz, R.; J. G. Behr e M. Ng (2016) Quantifying the economic and demographic impact of transportation infrastructure investments: A simulation study. *Simulation*, v. 92, n. 4, p. 377-393.
- Fiorello, D.; F. Fermi e D. Bielanska (2010) The ASTRA model for strategic assessment of transport policies. *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, p. 283-290.
- Forrester, J. W. e P. M. Senge (1980) Tests for building confidence in system dynamics models. In: Legasto JR, A. A.; J. W. Forrester e J. M. Lyneis (eds.) *System Dynamics*. New York: North-Holland.
- Hong, J.; Z. Chu; Q. Wang (2011) Transport infrastructure and regional economic growth: evidence from China. *Transportation*, v. 38, n. 5, p. 737-752.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017) Séries Históricas. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm>. Acesso em: 25 dez. 2017.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2015) Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: caracterização, tendências e custos para a sociedade. Relatório de pesquisa. Brasília: Ipea.
- Karnopp, D. C.; D. L. Margolis; R. C. Rosenberg (2012) *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. 5. ed. New York: John Wiley & Sons.
- Lakshmanan, T. R. (2011) The broader economic consequences of transport infrastructure investments. *Journal of Transport Geography*, v. 19, n. 1, p. 1-12.
- Litman, T. A. (2009) *Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications*, 2. ed., Victoria Transport Policy Institute.
- Liu, P. e D. Mu (2015) Evaluating Sustainability of Truck Weight Regulations: A System Dynamics View. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 8, n. 5, p. 1711-1730.
- Lobontiu, N. (2017) *System dynamics for engineering students: concepts and applications*. Academic Press.
- Menezes, R. G. e P. R. A. Sampaio (2012) Rochas Ornamentais no Noroeste do Estado do Espírito Santo. Rio de Janeiro: CPRM.
- Ministério dos Transportes Portos e Aviação Civil – MTPA e Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. (2016). Centro de Integração Logística – Desenvolvimento da Metodologia de Localização de CILs. Revisão e ajustes na base de dados georreferenciada do PNLT para aplicação da metodologia de localização de CILs. Etapa 5, Apêndice I. Tomo II.
- Morecroft, J. D. (2015) *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. John Wiley & Sons.
- Nabavi, E.; K. A. Daniell e H. Najafi (2017). Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability?. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, n. 1, p. 312-323.
- Ortúzar, J. D. e L. G. Willumsen (2001) *Modelling Transport*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.
- Ozbay, K.; D. Ozmen-Ertekin e J. Berechman (2007) Contribution of transportation investments to county output. *Transport Policy*, v. 14, n. 4, p. 317-329.
- Polícia Rodoviária Federal – PRF (2017) Acidentes. Disponível em: < <https://www.prf.gov.br/portal/dados-abertos/acidentes>>. Acesso em: 9 jan. 2018.
- Pwc – PricewaterhouseCoopers (2009) Meeting the 2050 Freight Challenge, Sydney, Disponível em: <<http://infrastructure.org.au/wp-content/uploads/2017/06/Freight-2050-Final-Multi-Colour.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2017.
- Schade, B. e W. Schade (2005) Evaluating Economic Feasibility and Technical Progress of Environmentally Sustainable Transport Scenarios by a Backcasting Approach with ESCOT. *Transport Reviews*, v. 25, n. 6, p. 647-668.
- Sterman, J. (2000) *Business Dynamics: System Thinking and Modelling for a Complex World*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Transportation Research Board – TRB (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. National Research Council., Washington D.C., EUA.
- Transportation Research Board – TRB (2014) *Highway Safety Manual: User Guide*. The National Academies, Washington D.C., EUA.
- Ventana Systems, Inc. (2018) Vensim Simulation Software. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>.
- Weisbrod, G. (2008) Models to predict the economic development impact of transportation projects: historical experience and new applications. *The Annals of Regional Science*, v. 42, n. 3, p. 519-543.
- Zagonel, A. A. e T. F. Corbet (2006) Levels of Confidence in System Dynamics Modeling: A Pragmatic Approach to Assessment of Dynamic Models. *International Conference of the System Dynamics Society*, 24., Nijmegen, The Netherlands. Proceedings... Nijmegen: ISDC, p. 1-19.