

PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO RISCO POTENCIAL DE ACIDENTES NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS

Jefferson Troglio

Christine Tessele Nodari

Aline Marian Callegaro

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia de Produção

RESUMO

O objetivo deste artigo é propor um método para a avaliação do risco potencial de acidentes no transporte de produtos perigosos em trechos específicos de rodovias. O risco é definido como a combinação entre a probabilidade potencial de ocorrer o acidente e a gravidade do dano causado. A abordagem por Revisão de Segurança Viária em Vias Existentes possibilita estimar a probabilidade potencial em trechos curtos de rodovias. A gravidade das consequências é estimada considerando: o perigo inerente ao tipo de acidente rodoviário (imobilização do veículo, danos estruturais, vazamento, incêndio e/ou explosão); as características dos produtos químicos transportados (inflamabilidade, toxicidade, reatividade e/ou grau de oxidação); e as vulnerabilidades do entorno da rodovia (ambiental e/ou populacional). A análise de risco é aplicada na identificação de trechos críticos da rodovia BR-101, entre os municípios de Osório e Torres (RS), para o planejamento de ações de emergência em resposta a acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos.

ABSTRACT

The aim of this paper is to propose a method for the evaluation of the potential risk of accidents associated with the transportation of hazardous goods on highways. Risk is defined as the combination of the probability of the occurrence of an accident and the gravity of the damage. The approach by Road Safety Reviews on Existing Roads makes it possible to estimate potential in short stretches of highways. The issue of licenses is considering: the danger inherent in the type of road risk (vehicle immobilization, structural damage, leakage, fire and/or explosion); as transported chemicals (flammability, toxicity, reactivity and/or degree of oxidation); and vulnerabilities of the surrounding environment (environmental and/or population). The risk analysis is used to identify critical sections of the highway BR-101, between the municipalities of Osório and Torres (RS), for the planning of emergency actions in response to accidents in the transport of hazardous products by road.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da economia e da população em todo o mundo há o aumento da utilização de produtos perigosos. Consequentemente ocorre uma grande movimentação de produtos perigosos pelos diversos modos de transporte. No Brasil, o modo de transporte predominante é o rodoviário. De acordo com a pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2011), o modo rodoviário de transporte de cargas possui a maior participação (61,1%). No estado do Rio Grande do Sul é ainda mais forte a predominância do modo de transporte rodoviário. Segundo o Plano Estadual de Logística e Transportes do Rio Grande do Sul – PELT-RS (RIO GRANDE DO SUL, 2014), o rodoviário é responsável por 88% dos deslocamentos de carga. Quanto à accidentalidade, envolvendo carga perigosas, no período entre 2006 e 2014, foram registrados 4.713 (quatro mil, setecentos e treze) eventos caracterizados como acidentes ambientais, pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). A maior parte dos acidentes ambientais registrados pelo IBAMA, cerca de 30 %, ocorreu em rodovias. A partir dessas informações, é evidente a importância do modo rodoviário no transporte de cargas no Brasil e, ainda, com maior ênfase no estado do Rio Grande do Sul, onde se destaca como o modo de transporte mais utilizado. Por essa razão a ocorrência de acidentes com produtos perigosos no modo rodoviário merece uma especial atenção. Embora a probabilidade de um acidente com produtos perigosos ocorrer seja baixa, as consequências desse acidente geralmente são graves: muitas vítimas; danos ao ambiente e a infraestruturas; além da perda econômica (Zografos e Androutsopoulos, 2008; Bersani *et al.*, 2010; Kazantzi

et al., 2011; Garbolino *et al.*, 2013; Mingarro, 2015). Cabe acrescentar que a natureza e a quantidade dos produtos transportados e envolvidos no acidente podem gerar diversos efeitos físico-químicos (fluxo térmico, sobre pressão, efeitos tóxicos, radiológicos e corrosivos, etc.). O cenário torna-se ainda mais complexo devido à multiplicidade de rotas de circulação (rodovias, nacionais, locais, etc.) e as múltiplas causas de acidentes (técnicos, organizacionais, humanos, naturais). Logo todos esses fatores tornam difícil a definição de planos de emergência específicos e indicam a necessidade de métodos preditivos para a avaliação do nível de risco dessas atividades de transporte (Tena-Chollet *et al.*, 2013). Uma questão importante nas discussões públicas, e nos esforços de pesquisa, é a identificação e o estabelecimento de sistemas integrados de gerenciamento de segurança para mitigar o risco inerente ao transporte de produtos perigosos (Zografos e Androutsopoulos, 2008). Neste contexto, o objetivo do artigo é propor um método para a avaliação do risco potencial de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos, em trechos específicos de rodovias, que possa auxiliar os gestores de rodovias no planejamento de ações de melhoria da segurança viária e de resposta a emergências. Este artigo está organizado em 5 seções, incluindo esta introdução. A seção 2 apresenta a sustentação teórica deste estudo. Na seção 3 é apresentada a metodologia adotada na pesquisa. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na seção 4. A seção 5 apresenta as considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de identificar riscos potenciais e suas consequências no transporte de produtos perigosos tem sido uma grande preocupação e amplamente reconhecida por muitos pesquisadores, órgãos governamentais e público em geral, como uma das principais questões do campo mais amplo de segurança do transporte (Kazantzi *et al.*, 2011). Gerenciar o risco para reduzir os potenciais impactos negativos do transporte de produtos perigosos é uma tarefa importante para a comunidade, o governo, os produtores e os expedidores de produtos perigosos. Por esta razão vários sistemas foram desenvolvidos para suporte à decisão ao longo das últimas décadas (Torretta *et al.*, 2017). Um exemplo de implantação de ação de emergência integradora é dado por Giaccone *et al.* (2016), que apresentam o projeto PTA-DESTINATION, criado pelo Programa Operacional para a Cooperação Transfronteiriça entre a Itália e a Suíça (2007-2013). O principal resultado deste projeto foi a definição de um modelo de análise de risco no transporte rodoviário de produtos perigosos, que resultou no desenvolvimento de um sistema de informação compartilhado chamado GIIS (*Global Integrated Information System*). O GIIS inclui dados ambientais, territoriais e técnicos relevantes para atender às necessidades das autoridades locais e das partes interessadas (privadas). Um dos objetivos do projeto PTA-DESTINATION foi o de implementar algumas aplicações móveis para a visualização de mapas de risco do transporte de produtos perigosos e a avaliação das áreas de danos, em caso de acidente, com o intuito de apoiar a avaliação e o gerenciamento de emergências.

O conceito de Risco (R) foi definido pelo Departamento dos Transportes dos EUA (US DOT, 1994) como o produto da gravidade de um potencial dano (G) e a probabilidade de ocorrência de um acidente (P). A partir deste tradicional conceito de risco, Martínez-Alegría *et al.* (2003) desenvolveram a base da metodologia que será utilizada neste estudo. Este método baseou-se em dados estatísticos de acidentes, de densidade de tráfego total, de densidade de tráfego específica para veículos que transportam produtos perigosos, e de classificações de vulnerabilidade para elementos ambientais e populacionais, em relação a diferentes tipos de produtos perigosos. A equação 1 expressa esta definição:

$$R = P \times G \quad (1)$$

em que R : risco potencial de acidentes;
 P : probabilidade de ocorrência de um acidente; e
 G : gravidade potencial do dano.

O modelo conceitual de risco de Martínez-Alegría *et al.* (2003) definiu que a gravidade de um potencial dano (G) pode ser considerada multidimensional e é condicionada principalmente pelo perigo intrínseco associado ao tipo de acidente (P_e), pelo dano inerente potencial (H_{hg}) relacionado ao tipo de produto perigoso transportado e pela vulnerabilidade (V) do meio ambiente onde o acidente pode ocorrer. O P_e é o perigo implícito a um acidente, que depende do envolvimento ou não de vazamento da substância transportada e, da ocorrência de incêndio e/ou explosão. O H_{hg} é o dano potencial inerente a um produto, o qual depende de propriedades como a inflamabilidade, a reatividade, a toxicidade, a corrosão e a oxidação. A vulnerabilidade (V), por sua vez, resulta da soma da vulnerabilidade ambiental (V_a) e da vulnerabilidade populacional (V_p). A V_p representa uma série de fatores de vulnerabilidade populacional. A V_a representa uma série de fatores de vulnerabilidade ambiental. As seguintes equações expressam estas definições:

$$G = P_e \times (H_{hg} + V) \quad (2)$$

$$G = P_e \times (H_{hg} + V_a + V_p) \quad (3)$$

$$R = P \times (P_e \times (H_{hg} + V)) \quad (4)$$

$$R = P \times (P_e \times (H_{hg} + V_a + V_p)) \quad (5)$$

em que R : risco potencial de acidentes;
 P : probabilidade de ocorrência de um acidente;
 G : gravidade potencial do dano;
 P_e : perigo intrínseco associado ao tipo de acidente;
 H_{hg} : dano inerente potencial devido ao tipo de produto perigoso transportado;
 V : vulnerabilidade;
 V_a : vulnerabilidade ambiental; e
 V_p : vulnerabilidade populacional.

Vários estudos foram realizados por diversos pesquisadores, baseados na metodologia criada por Martínez-Alegría *et al.* (2003), cujas adequações foram propostas para possibilitar a sua utilização em diferentes cenários. O modelo foi utilizado diretamente nas pesquisas de Arranz Zazo (2013); Cordeiro *et al.* (2016); Fernández (2014); Martínez-Alegría (2005); Matías *et al.* (2007); Mingarro (2015); Pedro (2006); Pedro e Costa (2009); Silva (2007) e Taboada *et al.* (2006). Diversos autores de estudos de análises de risco, no transporte rodoviário de produtos perigosos, fizeram muitas considerações a respeito das dificuldades encontradas para estimar a probabilidade de ocorrência de acidentes (Martínez-Alegría *et al.*, 2003; Bubbico *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2006; Matías *et al.*, 2007; Bersani *et al.*, 2010; Kazantzi *et al.*, 2011; Cordeiro, 2016; Mannering e Bhat, 2014; Tinoco *et al.*, 2016), conforme os exemplos apresentados a seguir. Para Taboada *et al.* (2006) seria excessivamente arbitrário, ou mesmo desnecessariamente restritivo, propor um modelo paramétrico para calcular a probabilidade de acidente conforme o modelo de Martínez-Alegría *et al.* (2003), devido à existência de um grande número de variáveis para determinar a probabilidade de um acidente, ao longo de um trecho específico de estrada. Além disso, Taboada *et al.* (2006) enfatizam que não existem dados estatísticos disponíveis que permitam uma estimativa automática da probabilidade de ocorrência de um acidente em trechos mais curtos de estradas. Para possibilitar a aplicação

das técnicas de redução de dimensionalidade aos fatores probabilidade e gravidade, de forma a simplificar o problema, Taboada *et al.* (2006) propuseram a construção de uma modelagem que leva em consideração a avaliação de risco por especialistas para um conjunto de trechos previamente selecionados. Desta forma, esses autores apresentam um modelo de análise do risco associado a um acidente, envolvendo o transporte de produtos perigosos ao longo de um determinado trecho de rodovia. O modelo compreende a combinação de elementos do modelo conceitual de Martínez-Alegría *et al.* (2003), com fatores específicos que, na opinião de especialistas, afetam o risco em determinados trechos de rodovia. Neste estudo foram identificados fatores de probabilidade e fatores de vulnerabilidade. A pesquisa realizada posteriormente por Matías *et al.* (2007), seguindo o mesmo modelo de Taboada *et al.* (2006), utilizou fatores para determinar o impacto de um acidente em trechos específicos de uma estrada, identificados como fatores de probabilidade e de gravidade. Uma alternativa apresentada no estudo de Tinoco *et al.* (2016), para possibilitar a análise da segurança na ausência de registros adequados de histórico de acidentes, é a utilização da revisão de segurança viária para avaliar o potencial de ocorrência de acidentes em rodovias. Segundo Schopf e Nodari (2007), a revisão de segurança viária é também denominada atualmente como auditoria de segurança em vias em operação. Trata-se de um método que visa a identificar as deficiências de segurança de uma via em operação, com o auxílio de listas de verificação. A revisão de segurança viária utilizada para a avaliação do risco viário potencial de segmentos rodoviários baseou-se no modelo proposto por Nodari (2003). O método considerou 34 características em cada quilômetro do trecho da rodovia estudada, onde o Risco Viário (RV) foi obtido pelo produto entre os pesos estimados para as características viárias e as notas atribuídas em inspeções em campo. Um diferencial importante a ser destacado no estudo realizado por Tinoco, Nodari e Pereira (2016), é que a análise multicritérios em termos de probabilidade de ocorrência de acidentes rodoviários no transporte de produtos perigosos, não está baseada em dados históricos. A abordagem diferenciada é pertinente, devido à baixa frequência dos acidentes rodoviários no transporte de produtos perigosos do trecho da rodovia em estudo. O que demandaria períodos muito longos de registros para a identificação de pontos críticos (acidentes por causas específicas, não devido ao acaso), com um nível razoável de significância. Além disso, os acidentes são eventos altamente influenciados pelo acaso, e os dados históricos se tornariam obsoletos a cada atualização que fosse realizada na rodovia.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método de trabalho foi estruturado nas seguintes etapas: (i) identificação dos principais fatores que influenciam o risco potencial de acidentes no transporte de produtos perigosos; (ii) elaboração de um método de análise de risco que considere os principais fatores identificados; (iii) obtenção de informações para a ponderação destes fatores (documentos técnicos, levantamentos de campo e análise de mapas); (iv) elaboração de mapas e tabelas que sintetizam os resultados da análise de risco; (v) análise dos resultados. O estudo foi aplicado na Rodovia BR-101, entre os municípios de Osório e Torres (RS). De acordo com Milanez (2015), em recente estudo publicado sobre a situação dos transportes de carga no Rio Grande do Sul para o Departamento de Planejamento Governamental (DEPLAN-RS), o tronco Rodoviário BR-101/BR-290 se constitui na principal rota de transportes da América do Sul, porque atende regiões que respondem por grande parte do PIB do continente. Tinoco *et al.* (2016) afirmam ainda que este trecho, desta rodovia federal, tem grande importância, porque serve de ligação com outros países do Mercosul e tem um grande tráfego de produtos perigosos. Analisando a evolução das pesquisas baseadas no modelo conceitual, proposto por Martínez-Alegría *et al.* (2003), e em estudos de análise de risco no transporte rodoviário de

produtos perigosos, observa-se que algumas premissas se consolidaram. O risco potencial de um acidente no transporte de produtos perigosos pode ser estimado a partir da probabilidade de ocorrer um acidente desta natureza e da gravidade das consequências deste acidente. Então, a partir do conceito de risco potencial, no presente estudo foram desenvolvidas formas para ponderar os diversos fatores que interferem na avaliação deste risco potencial, os quais são explicitados no decorrer desta seção do artigo. O método foi elaborado para ser aplicado em trechos de rodovias, visando a identificação de segmentos críticos. Desta forma, calcula-se o risco potencial de acidentes utilizando-se a Equação 5, apresentada no Referencial Teórico.

A probabilidade potencial (P) de ocorrer um acidente no transporte de produtos perigosos em segmentos rodoviários pode ser estimada com base em fatores ou variáveis, que consideram as características físicas das rodovias. Esta probabilidade potencial (P) pode ser obtida pela Revisão de Segurança Viária (RSV) de cada segmento da rodovia. O índice obtido desta forma foi denominado Índice de Segurança Potencial (ISP), por Nodari (2003), e Índice de Risco Viário (IRV), por Tinoco *et al.* (2016). A partir destes conceitos atribuiu-se a probabilidade potencial de acidentes, um índice obtido por revisão de segurança viária. Utilizando um procedimento padronizado de coleta de dados em campo, o método considerou 34 características em cada quilômetro do trecho da rodovia estudada, onde o Risco Viário (RV) foi obtido pelo produto entre os pesos estimados para as características viárias e as notas atribuídas em inspeções em campo. Foram consideradas nove macrocategorias, conforme apresentado na Tabela 1 (Tinoco *et al.*, 2016).

Tabela 1: Macrocategorias e características que compõem o Risco Viário

| Macrocategorias | Características | Macrocategorias | Características |
|------------------------------------|---|--------------------------------|--|
| Superfície do pavimento | 1 Buracos na pista | Elementos longitudinais | 19 Suavização de rampas |
| | 2 Resistência à derrapagem | | 20 Oportunidades de ultrapassagem |
| | 3 Formação de espelhos d'água | Elementos da seção transversal | 21 Distâncias de visibilidade |
| | 4 Eliminação de cascalho solto na pista | | 22 Larguras das faixas e acostamentos |
| Curvas | 5 Desnível entre faixa de tráfego e acostamento | Usuários vulneráveis | 23 Pavimentação dos acostamentos |
| | 6 Suavização de curvas horizontais | | 24 Taludes laterais suaves |
| | 7 Adoção de superlargura | | 25 Largura da faixa e acostamentos em pontes |
| | 8 Adoção de superelevação | | 26 Tráfego de ciclistas/pedestres |
| | 9 Incidência de curvas | | 27 Travessias para pedestres |
| Interseções / acessos | 10 Combinação entre alinhamento horizontal e vertical | Laterais da via | 28 Presença de elementos perigosos na lateral da via |
| | 11 Faixas adicionais e canalizações | | 29 Acessos a propriedade e comércio lindeiro |
| | 12 Iluminação artificial nas interseções | | 30 Localização e layout de pontos de ônibus |
| Sinalizações vertical e horizontal | 13 Linhas demarcadoras das faixas de rolamento | Elementos gerais | 31 Quantidade de outdoors comerciais |
| | 14 Uso de tachas refletivas nas linhas, | | 32 Transição entre ambientes rural/urbano |
| | 15 Credibilidade da sinalização vertical e horizontal | | 33 Compatibilidade entre velocidade regulamentada e diretriz |
| | 16 Quantidade adequada de placas de sinalização | | 34 Proteção contra a invasão de animais de grande porte |
| | 17 Uso de balizadores, | | |
| | 18 Legibilidade e conspicuidade da sinalização vertical | | |

O perigo é definido como um evento que tem potencial de causar danos, sendo assim está associado com o tipo de acidente, que é baseado nas possíveis consequências. Na pesquisa de Martínez-Alegría *et al.* (2003) são apresentados valores para a determinação do perigo em função do tipo de acidente (Tabela 2). Os valores para cada tipo de acidente estão entre 1 e 6, na escala de menor para maior gravidade do acidente.

Tabela 2: Valores atribuídos ao perigo intrínseco ao tipo de acidente rodoviário (Pe)

| Tipo de acidente | Valor do Pe |
|---|-------------|
| 1 - Acidente que impossibilita o veículo em continuar seu trajeto, sem nenhum dano ao tanque. | 1 |
| 2 - Tanque danificado, mas não há vazamento do produto. | 2 |
| 3 - Tanque danificado e ocorre o vazamento do produto. | 4 |
| 4 - Tanque danificado e o produto derramado está em chamas. | 6 |
| 5 - Explosão do produto. | 6 |

Martínez-Alegría *et al.* (2003) relacionaram o potencial de dano inerente (H_{hg}) às características agressivas intrínsecas de cada produto perigoso, causadoras de impactos negativos, em caso de acidentes. Assim, criaram 4 grupos de características: inflamabilidade, toxicidade/corrosão, reatividade e grau de oxidação. Para cada uma destas características foi criada uma escala para mensurar o potencial de dano e foi atribuída uma pontuação, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Índices de classificação por características de produtos químicos perigosos

| Inflamabilidade | H_i | Toxicidade | H_t | Reatividade | H_r | Grau de Oxidação | H_{go} |
|--|-------|---|-------|--|-------|--|----------|
| Não inflamável: o material não queima | 0 | Perigo mínimo. | 0 | Não reage | 0 | Não comburente ou moderada contribuição de oxigênio para inflamar materiais combustíveis nas proximidades. | 0 |
| Pode inflamar outros materiais combustíveis e/ou liberar gases inflamáveis durante a reação. | 1 | Perigos decorrentes de fumos, vapores liberados durante a decomposição do material. Materiais com baixa radiação. | 1 | Estável, mas torna-se instável com o aquecimento. Os recipientes podem explodir quando aquecidos. | 1 | Comburente muito poderoso: reage de forma violenta ou explosiva com muitos materiais. | 1 |
| Precisa ser pré-aquecido para queimar, pode arder, mas não explodirá facilmente. | 2 | Moderadamente perigoso: queimaduras, irritação. Materiais com nível moderado de radiação. | 2 | Possíveis mudanças químicas violentas a altas temperaturas. Polimerização explosiva com o aquecimento. | 2 | | |
| Pode queimar rapidamente e/ou inflamar fazendo contato com o ar ou umidade. | 3 | Muito perigoso: pode produzir lesões graves. Materiais radioativos que podem produzir um alto nível de radiação. | 3 | Reação explosiva à fonte iniciadora, a alta temperatura ambiente, ao superaquecimento, e a fricção. Reação explosiva ao contato com água e combustíveis. | 3 | | |
| Altamente inflamável: gases, líquidos e sólidos inflamáveis; materiais pirofosfóricos. | 4 | Tóxico e extremadamente perigosos. Materiais que podem causar a morte. | 4 | Capaz de detonar em condições ambiente. Perigo de explosão em massa. | 4 | | |

Assim, o dano inerente potencial de cada produto perigoso foi definido pela equação proposta por Martínez-Alegría *et al.* (2003):

$$H_{hg} = \frac{H_i + H_r + H_t}{3} + H_{go} \quad (8)$$

em que H_i : inflamabilidade do produto;
 H_r : tendência a reagir;
 H_t : toxicidade / corrosividade; e
 H_{go} : grau de oxidação.

Para a avaliação dos resultados, propôs-se o Índice de Dano Potencial Inerente (IH_{hg}), obtido por meio da multiplicação do resultado do H_{hg} por 2, para que fosse obtida uma pontuação máxima de 10. O dano potencial inerente é classificado como: crítico ($\geq 7,5$), elevado ($\geq 4,0$), moderado ($\geq 2,5$) e baixo ($< 2,5$). A identificação dos produtos perigosos transportados

é realizada por uma codificação numérica denominada número ONU e Número de Risco. Para facilitar o entendimento, cabe explicar que a cada produto é atribuída uma codificação numérica de 4 algarismos denominada número ONU. A indicação da natureza e a intensidade do risco é dada por outro número de dois ou três algarismos denominado Número de Risco. Estes números são colocados em placas retangulares na cor laranja que contém, em sua parte superior, o número de risco e, na inferior, o número ONU. Os painéis de segurança e rótulos de risco são afixados nos compartimentos de carga (granel e embalado), e na parte traseira e dianteira dos veículos. O transporte rodoviário de produtos perigosos no Brasil é regulamentado pela Resolução ANTT nº 5232, de 14/12/2016. O modelo de Martínez-Alegría *et al.* (2003) estimou a vulnerabilidade geral (V), considerando basicamente a Vulnerabilidade Populacional (V_p) e a Vulnerabilidade Ambiental (V_a). Para a análise de risco do presente estudo se considerou a Vulnerabilidade Populacional (V_p), avaliando a ocupação humana; e a Vulnerabilidade Ambiental (V_a), avaliando a média da sensibilidade da vegetação e dos recursos hídricos. A Tabela 4 apresenta uma síntese das escalas de ponderação utilizadas.

Tabela 4: Escala de ponderação da sensibilidade dos aspectos de vulnerabilidade

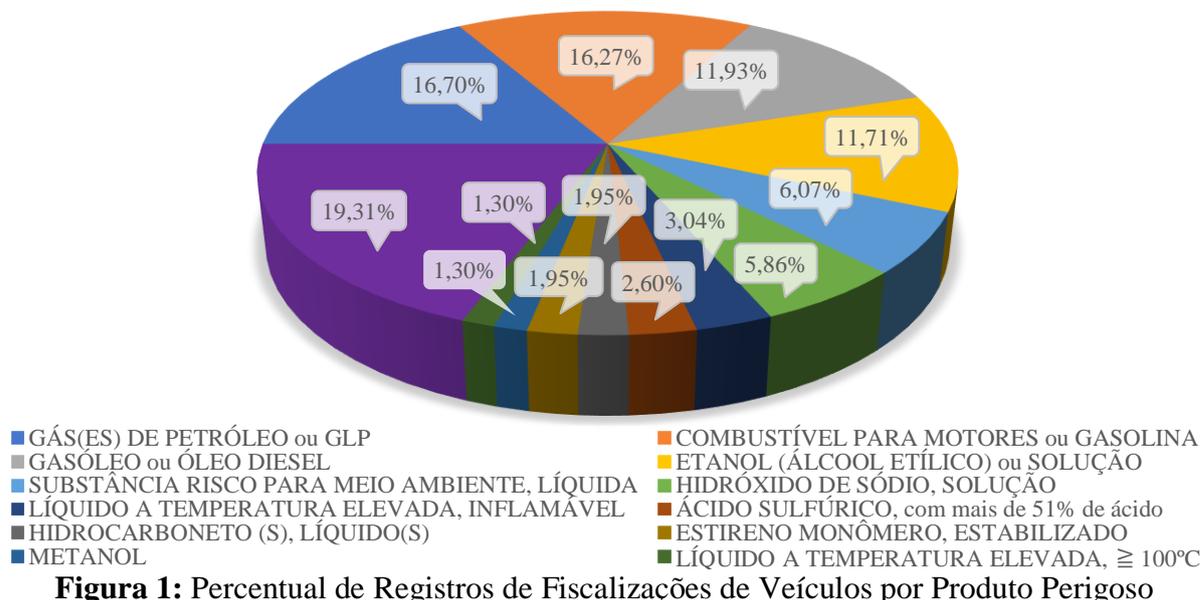
| Vegetação | Vulnerabilidade Ambiental | | Vulnerabilidade Populacional | | Vulnerabilidade | |
|---|---------------------------|--|---|------------|-----------------|----------|
| | Vegetação | Recursos hídricos | Ocupação humana | Escala | Escala | |
| Presença de Unidade de Proteção. | | Pontes sobre rio e margens de lagoa (até 100m) para classes especial 1, 2 e 3. | Urbana: ocupação humana com cobertura de assentamentos maior que 70% da área do trecho analisado. | $\geq 8,5$ | | Crítica |
| Áreas de serra e floresta densa de mata nativa. | | Águas classes especial 1, 2 e 3 até 2km da rodovia com captação pública até 5km. | Suburbana: ocupação humana com cobertura de assentamentos entre 40% e 70% da área do trecho analisado: sensibilidade elevada. | $\geq 7,5$ | | Elevada |
| Áreas de formações pioneiras. | | Águas classes especial 1, 2 e 3 fora da área de influência com captação pública até 5km. | Rural: ocupação humana com cobertura de assentamentos entre 10% e 40% da área do trecho analisado. | $\geq 4,0$ | | Moderada |
| Áreas alagadas, banhados, formações pioneiras fora da área de influência. | | Águas classes especial 1, 2 e 3 fora da área de influência sem captação pública até 5km. | Remota: ocupação humana com cobertura de assentamentos menor que 10% da área do trecho analisado. | $< 4,0$ | | Baixa |

A sensibilidade da vegetação foi atribuída com base nos critérios do Código Florestal (BRASIL, 2000) e do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2012). A sensibilidade dos recursos hídricos considerou a classificação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005). A sensibilidade da ocupação humana foi fundamentada principalmente na estimativa do percentual de cobertura da ocupação humana a cada quilômetro analisado, utilizando a contagem de quadrículas nos mapas (Tinoco *et al.*, 2016). A partir do modelo conceitual adotado analisou-se o Risco Potencial de cada trecho da rodovia, para cada produto transportado identificado na rodovia. O risco potencial é classificado como: crítico (>60), elevado (>50), moderado (>40) e baixo (≤ 40).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A pesquisa foi realizada com base em dados referentes ao transporte de produtos perigosos na rodovia BR-101, entre os municípios de Osório e Torres no Estado do Rio Grande do Sul. Este trecho importante de uma das principais rodovias federais do Brasil serve de ligação com outros países do Mercosul e, por este motivo, tem um grande tráfego de produtos perigosos. A duplicação desta parte da rodovia federal foi inaugurada oficialmente em 2012 e, atualmente, a rodovia apresenta bom estado de conservação do pavimento e um conjunto adequado de sinalização que inclui placas específicas para o tráfego de produtos perigosos. Esta importante via de transporte rodoviário atravessa áreas de preservação ambiental, áreas indígenas, áreas

urbanas densamente povoadas, bacias de captação de água para abastecimento de populações, túneis com 1.800 metros de extensão, diversos viadutos, várias pontes, e diversos empreendimentos lindeiros. Desta forma é relevante o risco de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos, e a diversidade de possíveis cenários é grande. O tráfego de produtos perigosos na rodovia no trecho entre Osório e Torres/RS foi avaliado através de fiscalizações realizadas por uma equipe da área de Gestão de Riscos em Desastres da UFRGS, em conjunto com a Polícia Rodoviária Federal. A amostra constituiu-se de 461 registros de veículos transportando produtos perigosos em que foram identificados 64 produtos perigosos. Os produtos perigosos de Classe 3 – Líquidos Inflamáveis representam a maioria dos veículos registrados (54%), seguidos pelos de Classe 2 – Gases (20,4 %) e Classe 8 (11,7 %). O total obtido com a soma dos 4 produtos mais identificados representa a maioria dos registros da fiscalização (56,62 %). São eles o GLP (16,70%), a Gasolina (16,27%), o Diesel (11,93%), e o Etanol (11,71%). Com os 12 produtos perigosos mais identificados obtêm-se mais de 80% dos veículos registrados na fiscalização. A Figura 1 sintetiza estes resultados.



A Tabela 5 apresenta, como exemplo, a avaliação do dano inerente potencial de alguns daqueles produtos transportados na rodovia.

Tabela 5: Exemplo de Avaliação do Dano Inerente Potencial dos Produtos Transportados

| Número ONU (ANTT-5232/16) | Produto Perigoso | Estado Físico | Índices de classificação de grupos de características de produtos químicos perigosos | | | | Dano Inerente Potencial (de 0 até 10) |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| | | | Inflamabilidade (de 0 até 4) | Toxicidade (de 0 até 4) | Reatividade (de 0 até 4) | Oxidação (de 0 até 4) | |
| 1824 | Hidróxido de sódio, solução | Líquido | Não inflamável. 0 | Muito perigoso. 3 | Instável com o aquecimento. 1 | Comburente. 1 | Elevado 4,7 |
| 1979 | Mistura de gases raros, comprimida. | Gás | Não inflamável. 0 | Perigo por fumos e/ou vapores. 1 | Não reage 0 | Não comburente. 0 | Baixo 0,7 |
| 3052 | Dicloreto de etilalumínio | Líquido | Altamente inflamável. 4 | Muito perigoso. 3 | Reação explosiva. 3 | Comburente. 1 | Crítico 8,7 |
| 3341 | Dióxido de tiouréia | Sólido | Não inflamável. 0 | Moderadamente perigoso. 2 | Reação explosiva. 3 | Não comburente. 0 | Moderado 3,3 |

A Tabela 6 exemplifica o potencial de risco de acidentes com alguns produtos químicos, em cenários de acidente com vazamento e/ou explosão em trecho da rodovia.

Tabela 6: Exemplo da análise de risco por produto transportado em trecho da rodovia

| Número ONU | Produto Perigoso (ANTT-5232/16) | Estado Físico | Dano Inerente Potencial do Produto Perigoso (de 0 à 10) | Perigo Intrínseco ao Tipo de Acidente Rodoviário (de 0 até 6) | km 73 - 74 | | | Índice de Risco do Acidente |
|------------|-------------------------------------|---------------|---|---|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | | | | Risco Viário Potencial (de 0 à 10) | Grau de vulnerabilidade | | |
| | | | | | | Recursos Hídricos (de 0 à 10) | Vegetação (de 0 à 10) | |
| 1824 | Hidróxido de sódio, solução | Líquido | Elevado 4,7 | | | | | Elevado 50,9 |
| 1979 | Mistura de gases raros, comprimida. | Gás | Baixo 0,7 | | | | | Baixo 34,4 |
| 3052 | Dicloreto de etilalumínio | Líquido | Crítico 8,7 | | | | | Crítico 67,4 |
| 3341 | Dióxido de tiouréia | Sólido | Moderado 3,3 | | | | | Moderado 45,4 |

A Figura 2, por sua vez, apresenta uma imagem que resume a análise de potencial de risco de acidentes, com todos os produtos químicos transportados identificados, em cenários de acidente com vazamento e/ou explosão, em todos os trechos da rodovia, no sentido Norte - de Osório (km 88) até Torres (km 0). Observa-se que os riscos mais elevados para a maioria dos produtos transportados foram identificados entre o km 69 e 68, e também entre o km 41 e 40. No segmento entre o km 41 e 40, o risco é elevado devido à vulnerabilidade crítica máxima dos recursos hídricos, juntamente com a moderada vulnerabilidade da vegetação existente. No segmento do túnel, entre o km 69 e 68, o risco é elevado devido às particularidades que influenciam na vulnerabilidade populacional crítica, resultante da passagem dos veículos e pessoas pelo túnel. Quando ocorre o transporte de produtos perigosos com dano inerente potencial crítico, com propilenoimina estabilizada ou dicloreto de etilalumínio, o risco potencial de acidentes fica crítico em mais de 30% da rodovia.



Figura 2: Imagem resumo da análise de risco de acidente com vazamento e/ou explosão de produto perigoso em cada trecho da rodovia no sentido Osório - Torres (Norte)

A Figura 3 apresenta os resultados do Risco Potencial obtido pela média do Risco Potencial dos 64 produtos identificados na rodovia. O trecho de risco mais crítico se localiza na zona urbana de Osório, entre o km 88 e 85, onde foram identificadas importantes vulnerabilidades, principalmente devido a Área de Proteção Ambiental do Morro de Osório.

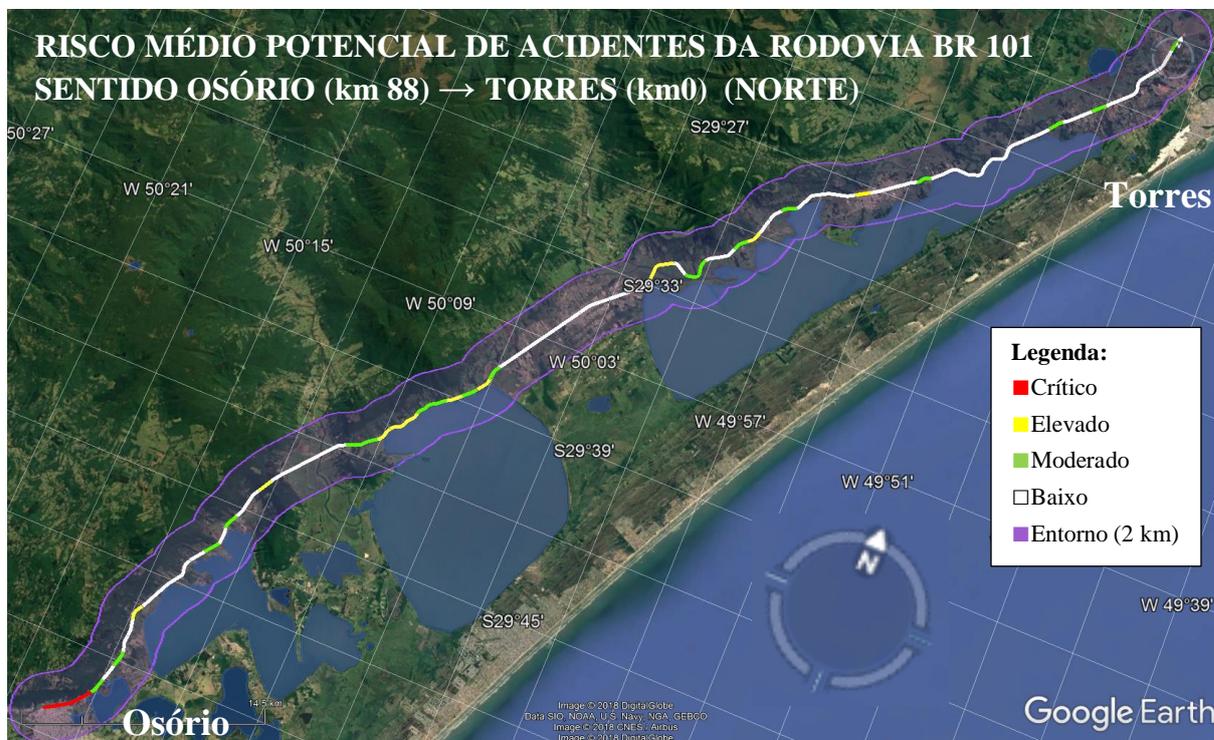


Figura 3: Mapa com o Risco Médio Potencial da Rodovia BR 101 – Sentido Norte

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo propor um método de análise do risco de acidentes no transporte de produtos perigosos por segmentos, em rodovias existentes, e aplicá-lo na rodovia BR-101 de Osório à Torres. No estudo foi determinado o risco potencial de acidentes para cada trecho analisado da rodovia, e identificados os trechos críticos. As informações obtidas possibilitam a priorização das ações preventivas, assim como a definição de políticas públicas, pelos agentes responsáveis, para a redução do risco de acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos. A abordagem do estudo busca contribuir para preencher a lacuna da pouca utilização da revisão de segurança de vias existentes, na estimativa da probabilidade de acidentes rodoviários, no transporte de produtos perigosos. Essa é uma questão importante, pois a maior parte dos estudos na área de gerenciamento de riscos, no transporte de produtos perigosos, estima a probabilidade da ocorrência de acidentes a partir de dados estatísticos. Porém, para a maioria dos gestores de rodovias, estes dados não existem e/ou não são aplicáveis a segmentos rodoviários curtos, ou ainda não há registros por períodos longos o suficiente para serem significativos. Sem uma estimativa de probabilidade razoável não é possível ponderar o risco potencial de ocorrência de acidentes. Recomenda-se, para trabalhos futuros, avaliar a possibilidade de melhorar a ponderação do dano inerente ao produto químico perigoso com a inclusão de fatores que identifiquem a influência de características dos produtos perigosos em relação à importância da reação com a água e do impacto ambiental. A vulnerabilidade poderia incluir a sensibilidade do solo (ambiental) e das infraestruturas (vias de transporte, fornecimento água, fornecimento energia elétrica,

equipamentos de comunicação, e instalações com combustíveis). Seria adequado ponderar a importância dada por especialistas a cada um dos fatores considerados. A inclusão ao modelo apresentado de outros fatores de ponderação, que aumentem a abrangência dos aspectos e características considerados, poderão tornar o modelo mais assertivo e abrangente. O método proposto pode auxiliar aos gestores de rodovias no planejamento do processo de tomada de decisões em operações de emergência, a partir da identificação de áreas com maior risco potencial de acidentes no transporte de produtos perigosos. Esta metodologia pode evoluir para a forma de aplicativo para celulares, para serem utilizados em tempo real, por equipes de atendimento a emergências no transporte de produtos perigosos, ajudando a determinar o risco potencial envolvido em um cenário específico de acidente.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela concessão de bolsas de pesquisa que viabilizaram a realização do trabalho; ao Centro de Pesquisas e Estudos sobre Desastres no Rio Grande do Sul (CEPED/RS) e ao Laboratório de Geoprocessamento (Centro de Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul), pelo suporte durante a pesquisa realizada.

REFERÊNCIAS

- Arranz Zazo, Á. (2013) *Análisis de riesgos ambientales en el transporte de mercancías peligrosas con métodos multivariantes. Regresión logística*. 2013. 282 p. Proyecto fin de carrera - Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Bersani, C.; R. Minciardi; A. M. Tomasoni e R. Sacile (2010) Risk averse routing of hazardous materials with scheduled delays. In: *Security and Environmental Sustainability of Multimodal Transport*. Springer, Dordrecht, 2010. p. 23-36.
- Brasil (2000) Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF.
- Brasil (2005) Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água, dá diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 18 mar. 2005, págs. 58-63.
- Brasil (2016) Resolução da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) nº 5232, de 14 de dezembro de 2016. Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de produtos Perigosos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 14 dez. 2016.
- Bubbico, R.; M. Conforti e B. Mazarotta (2006) TrHazGis: GIS methodology for hazardous goods transportation risk analysis. In: *Proceedings of the Conference VGR – Risk Management and Evaluation, 17– 19 October 2006*, Pisa, Italy.
- Cordeiro, F. G.; B. S. Bezerra; A. S. P. Peixoto e R. A. R. Ramos (2016) Methodological aspects for modeling the environmental risk of transporting hazardous materials by road. *Transportation research part D: transport and environment*, v. 44, p. 105-121, 2016.
- CNT (2011) Confederação Nacional do Transporte. *Plano CNT de Transporte e Logística 2011*. Brasília, 2011.
- Fernández, D. C. (2014) *Desarrollo de un Sistema de Gestión y Seguimiento de Mercancías Peligrosas*. 2014. 286 p. Trabajo Fin de Grado - Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática - Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Garbolino, E.; D. Lachtar; R. Sacile e C. Bersani (2013) Vulnerability and resilience of the territory concerning risk of dangerous goods transportation (DGT): proposal of a spatial model. *Chemical Engineering Transactions*, v. 32, p. 91-96.
- Giacone, M. O.; A. Navarretta e F. Bratta (2016) PTA-DESTINATION: A Decision Support System To Ensure Human And Environmental Protection. *WIT Transactions on The Built Environment*, v. 160, p. 133-143.
- Google Corporation (2016). Google Earth Release 7.0. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acessado em 06/02/2018.
- IBAMA (2007 a 2015) Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Relatório de Acidentes Ambientais 2006 a 2014*. 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/relatorios/acidentes_ambientais>. Acesso em: 16 jul. 2017.
- IBGE (2012) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico da vegetação brasileira*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 1272 p.

- Kazantzi, V.; N. Kazantzis; e V. C. Gerogiannis (2011) Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 24, n. 6, p. 767-773.
- Mannering, F. L. e C. R. Bhat (2014). Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. *Analytic methods in accident research*, v. 1, p. 1-22.
- Martínez-Alegria, R. (2005) *Riesgos ambientales en el tráfico de mercancías peligrosas por carretera*. Tesis Doctoral – Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Universidad de Vigo, Vigo, España. 319 p.
- Martínez-Alegria, R.; C. Ordóñez e J. A. Taboada (2003) A conceptual model for analyzing the risks involved in the transportation of hazardous goods: implementation in a Geographic Information System. *Human and Ecological Risk Assessment*, Philadelphia, v. 9, n. 3, p. 857-879.
- Matías, J. M.; J. Taboada; C. Ordóñez e P. G. Nieto (2007) Machine learning techniques applied to the determination of road suitability for the transportation of dangerous substances. *Journal of hazardous materials*, v. 147, n. 1-2, p. 60-66.
- Mingarro, A. S. (2015) *Evolución del modelo de evaluación del riesgo en el transporte de mercancías*. Trabajo Fin de Grado - Ingeniería en Organización Industrial - Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid. 373 p.
- Nodari, C. T. (2003) *Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 210 f.
- Pedro, F. G. (2006) *Acidentes com transporte rodoviário de produtos perigosos: análise e aplicação de modelo conceitual georreferenciado para avaliação de risco ambiental no município de Campinas-SP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas. 133 f.
- Pedro, F. G. e D. C. Costa (2009) Vulnerabilidade e Gravidade Ambiental Devido a Acidentes com Transporte Rodoviário de Combustíveis no Município de Campinas – SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 61.
- Rio Grande do Sul (estado) (2014) Secretaria de Transportes. *Plano Estadual de Logística e Transportes do Rio Grande do Sul (PELT/RS)*. Relatório Parcial com as Hipóteses de Referência, Porto Alegre.
- Schopf, A. R. e C. T. Nodari (2007) Revisão de Segurança Viária: Proposição de uma lista de verificação adaptada à realidade brasileira. In: *XXI ANPET Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007*, Rio de Janeiro. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2007.
- Silva, F. N. (2007) *Avaliação do risco associado a actividades industriais e de transporte de substâncias perigosas, 2007*. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Departamento de ambiente e ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. 128 f.
- Taboada, J.; J. M. Matías; A. Saavedra; C. Ordóñez e R. Martínez-Alegria (2006) Neural network models for assessing road suitability for dangerous goods transport. *Human and Ecological Risk Assessment*, 12(1), 174-191.
- Tena-Chollet, F.; J. Tixier; G. Dusserre & J. F. Mangin (2013) Development of a spatial risk assessment tool for the transportation of hydrocarbons: Methodology and implementation in a geographical information system. *Environmental modelling & software*, v. 46, p. 61-74.
- Tinoco, M. A. C.; C. T. Nodari e K. R. S. Pereira, (2016) Vulnerabilidade ambiental, social e viária em acidentes com transporte de produtos perigosos: estudo de caso na BR-101 entre Osório e Torres, Rio Grande do Sul, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública* (ENSP. Impresso), v. 32, p. 1-13.
- Torretta, V. e A. G. Capodaglio (2017) Strategic environmental assessment: a critical review of procedural soundness and reliability. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, v. 16, n. 1.
- US DOT (1994) United States Department of Transportation. *Guidelines for applying criteria to designate routes for transportation hazardous materials*. FHWA-SA-94-083. Federal Highway Administration, Washington DC, USA, 1994.
- Zografos K. G. e K. N. Androusoyopoulos (2008) A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions. *Transportation Research Part C*, v. 16, p. 684-703.

Jefferson Troglia (jefferson.troglia@gmail.com)
Christine Tessele Nodari (piti@producao.ufrgs.br)
Aline Marian Callegaro (nimacall@gmail.com)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia de Produção
Av. Osvaldo Aranha DEPROT/PPGEP, 99 - 5º Andar - Bairro Bom Fim. Porto Alegre. Rio Grande do Sul
CEP: 90035-190. Fone: +55 51 33083491