



Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia de Transportes

Transporte de Produtos Perigosos

PTR 3439
Transporte e Meio Ambiente

Prof. Dr. Cassiano A. Isler
2023.1



- Definições
- Legislação
 - Internacional
 - Nacional
 - Estadual
 - Municipal
- Modelagem de Risco
- Modelagem para Minimização de Risco



Definições



- **Produto Perigoso**

Material que representa algum tipo de ameaça ao meio ambiente e/ou à saúde ou segurança da população¹

- **Carga Perigosa**

Material que representa ameaça durante o transporte, por exemplo, bobinas de aço na rodovia²

- **Perigo**

Função da composição química de um produto¹

- **Risco**

Maneira como essa substância se relaciona com outro fator, como transporte e exposição¹

¹ ANTT (2012). Transporte de produtos perigosos no Mercosul.

² QUEIROZ, M. T. A. (2014) Acidentes no transporte de cargas/produtos perigosos no Colar Metropolitano do Vale do Aço, Minas Gerais.



Legislação



- **Internacional**

ONU (1976)

Recommendations on the Transport of Dangerous Goods
Orange Book

Mercosul (1996)

Acordo para a Facilitação do Transporte Terrestre de
Produtos Perigosos
Complementado pela Resolução Mercosul N° 10/2000

Globally Harmonized System (GHS) (1992)

Sistema internacional para comunicação sobre o perigo
no transporte de produtos perigosos

- **Internacional**

Globally Harmonized System (GHS)

Perigos	Pictogramas
Explosivos	
Gases Inflamáveis, Aerossóis Inflamáveis, Líquidos Inflamáveis, Sólidos Inflamáveis, Líquidos Pirofóricos, Sólidos Pirofóricos, Substâncias e Misturas sujeitas a Auto Aquecimento, Substâncias e Misturas que em contato com água Emitem Gases Inflamáveis.	
Gases Oxidantes, Líquidos Oxidantes, Sólidos Oxidantes	
Gases sob pressão	
Substâncias e Misturas Auto-Reagentes, Peróxidos Orgânicos	

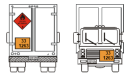
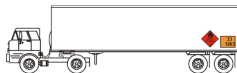
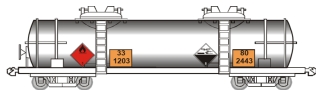
- **Nacional**

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

NBR 7500 (2014)

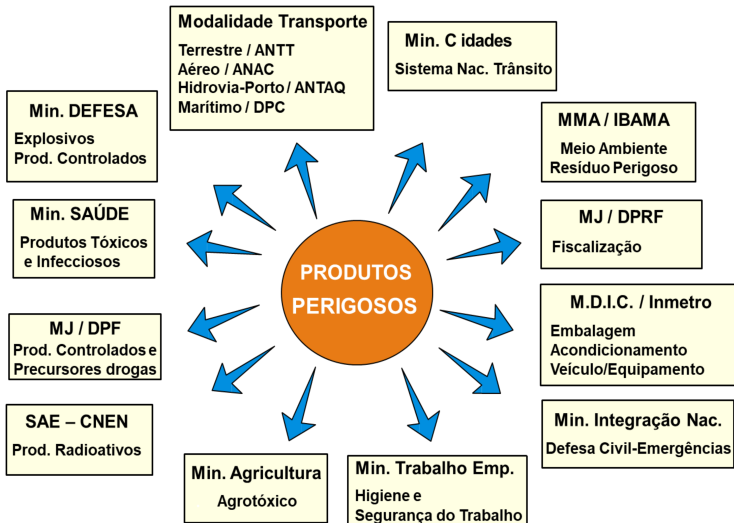
Painel de segurança de identificação de uma carga perigosa contém o número de risco (dois dígitos) e o número da ONU (quatro dígitos).

Rótulo de segurança exibe o símbolo do risco, nome e número da classe ou subclasse de risco.





● Nacional





- **Nacional**

Decreto 96.044 (1988) Lei Nº 10.233 (2001)

Parecer/ANTT/FAB/Nº 151 (2003)

Resolução ANTT Nº 3665 (2011)

Resolução ANTT Nº 5.232 (2016)

Agência Nacional de Transporte Terrestre

Regulamentação do Transporte de Produtos Perigosos

Diretrizes sobre os procedimentos em caso de emergências, acidentes ou avarias

Direitos, responsabilidades, fiscalização e penalidades

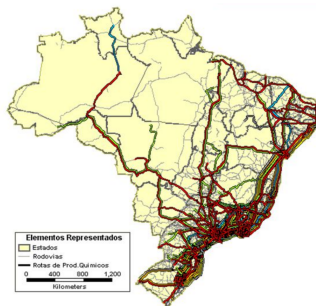
Declaração de itinerário, tipo de carga e quantidade

- **Nacional**

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

Instituto de Pesquisa Rodoviária

Sistema com cerca de 26.000 rotas



DNIT

- **Nacional**

Resolução ANTT N° 420

Subdivisão em classes:

- (1) Explosivos
- (2) Gases Comprimidos, Liquefeitos ou Altamente Refrigerados
- (3) Líquidos Inflamáveis
- (4) Sólidos inflamáveis, produtos passíveis de queima espontânea ou emissores gases inflamáveis em contato com água
- (5) Substâncias Oxidantes e Peróxidos Orgânicos
- (6) Substâncias Tóxicas e Substâncias Infectantes
- (7) Substâncias Radioativas
- (8) Corrosivos
- (9) Substâncias Perigosas Diversas





- **Estadual**

- Santa Catarina**

- Decreto Estadual N° 2.894 (1998): Programa Estadual de Controle do Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos.

- Rio Grande do Sul**

- Decisão Normativa N° 94 (2015): restringe circulação de veículos com produtos perigosos em rodovias específicas.

- Amazonas**

- Lei N° 2.513 (1998): obrigatoriedade do cadastro de empresas junto ao Órgão Estadual do Meio Ambiente.

- Minas Gerais**

- Lei N° 22805 (2017): medidas relativas a acidentes no transporte de produtos ou resíduos perigosos no Estado.

- São Paulo**

- Projeto de Lei N° 125 (2016): envio de relatórios de atendimento a acidentes rodoviários no transporte de produtos perigosos.

- Rio de Janeiro**

- Projeto de Lei N° 1097 (2015): dispõe sobre a produção, armazenamento e transporte de cargas perigosas.



- **Municipal**

São Paulo

Lei 11.368 (1993)

Regulamenta o transporte de produtos perigosos com diretrizes sobre rotas e horários permitidos à esse tipo de transporte, assim como medidas cabíveis em caso de descumprimento da lei.

Rio de Janeiro

Decreto N° 29.231 (2008)

Regulamentação direcionada ao transporte de cargas em geral, com restrição horária e uma relação de vias em que o tráfego é permitido.



Modelagem de Risco



Conforme anteriormente, risco é “maneira como um produto perigoso se relaciona com outro fator, como transporte e exposição”.

Um modelo para caracterização de risco associado ao transporte de produtos perigosos é definido pelo U.S. Department of Transportation (USDOT) no documento [Highway Routing of Hazardous Materials](#).

Este curso aborda o resumo simplificado de um artigo baseado naquele manual¹, tal que o risco em um segmento rodoviário é calculado segundo a probabilidade de ocorrência de acidentes em que há liberação de produtos perigosos na via e as consequências desse acidente.

¹ Harwood, D. W., Viner, J. G., and Russell, E. R. (1990). Truck accident rate model for hazardous materials routing. *Transportation Research Record*, (1964).



O risco em um segmento rodoviário i é calculado por:

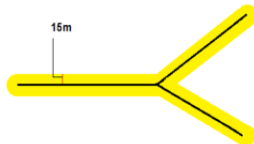
$$R_i = PA_i \cdot D_i \cdot A_i$$

onde:

PA_i = probabilidade de ocorrência de acidentes no segmento i com liberação de produtos perigosos (%);

D_i = densidade populacional da área atingida pela liberação de produtos perigosos no segmento i [$hab./km^2$].

A_i = área exposta devido ao acidente, calculada como um buffer ao redor do segmento i [km^2].





A probabilidade de ocorrência de acidentes PA_i com liberação de produtos perigosos é dada por:

$$PA_i = TAC_i \cdot PLP_i$$

onde:

TAC_i = taxa de acidente envolvendo caminhões no segmento i (acidentes/veículo-km);

PLP_i = probabilidade de liberação de produto perigoso dada a ocorrência de um acidente no segmento i (%);



A taxa de acidentes TAC_i é calculada por:

$$TAC_i = \frac{NA_i \cdot 10^6}{VDMA_i \cdot T \cdot 365}$$

onde:

T = duração do período de observação;

NA_i = número observado de acidentes envolvendo caminhões no segmento i ;

$VDMA_i$ = volume diário médio no segmento i (veíc./dia).

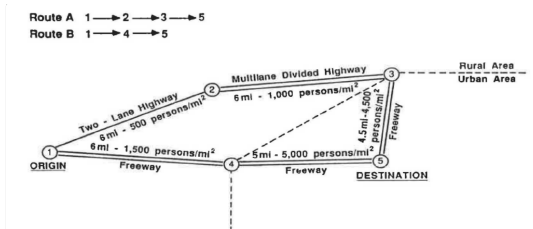


A tabela a seguir indica valores de referência para a probabilidade de liberação de produto perigoso dada a ocorrência de um acidente no segmento i (PLP_i) a partir de observações nos EUA.

Area	Road type	Truck accident rate (TAC; million veh-mi)	Probability of release given na accident (PLP; %)	Releasing accident rate (PA;%)
Rural	Two-lane	2.19	0.086	0.19
Rural	Multilane undivided	4.49	0.081	0.36
Rural	Multilane divided	2.15	0.082	0.18
Rural	Freeway	0.64	0.090	0.06
Urban	Two-lane	8.66	0.069	0.60
Urban	Multilane undivided	13.92	0.055	0.77
Urban	Multilane divided	12.47	0.062	0.77
Urban	One-way street	9.70	0.056	0.54
Urban	Freeway	2.18	0.062	0.14

¹ Harwood, D. W., Viner, J. G., and Russell, E. R. (1990). Truck accident rate model for hazardous materials routing. Transportation Research Record, (1964).

Modelagem de Risco



(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Route	Route segment	Truck accident rate (accidents per million veh-mi) ^a	Probability of release given an accident ^b	Length (mi)	Release probability ^c	Population density (persons/mi ²)	Impact zone width (mi)	Total persons exposed ^d	Persons exposed per mi ^e	Population risk ^f
		TAC_i	PLP_i		PA_i	D_i		$A_i \cdot D_i$		R_i
A	1-2	2,19	0,086	6,0	1,130	800	0,5	4,800	800	904
	2-3	2,15	0,082	6,0	1,058	1,000	0,5	6,000	1,000	1,058
	3-5	2,18	0,062	4,0	0,608	5,000	0,5	20,000	5,000	3,041
										5,003
B	1-4	0,64	0,090	6,0	0,346	1,000	0,5	7,000	1,000	346
	4-5	2,77	0,062	5,0	0,858	5,000	0,5	20,000	5,000	4,290
										4,636

ROUTE B INVOLVES LESS RISK THAN ROUTE A

* Neste exemplo, PA_i é resultado da multiplicação de TAC_i e PLP_i pois aquele está em unidades de veículo por comprimento de segmento (million veh-miles).

¹ Harwood, D. W., Viner, J. G., and Russell, E. R. (1990). Truck accident rate model for hazardous materials routing. *Transportation Research Record*, (1964).



Modelagem para Minimização de Risco

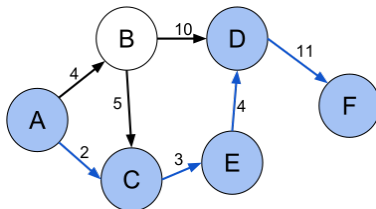
Modelagem para Minimização de Risco



Dado o risco em cada arco de uma rede, tem-se o problema de determinação das rotas que minimizem o risco total em número de pessoas expostas caso um acidente ocorra.

Esse problema não exige que todos os arcos ou nós da rede de tráfego sejam visitados, mas somente aqueles que viabilizem o transporte de carga de uma origem a um destino.

Na literatura esse problema é definido como “Shortest Path Problem” ou “Problema de Caminho Mínimo”.



Wikimedia



Existem diferentes algoritmos capazes de resolver o problema de caminho mínimo entre pares OD de maneira eficiente.

Algoritmo de Dijkstra: resulta em caminhos mínimos entre uma origem e um destino com custos não-negativos nos arcos.

Algoritmo de Bellman-Ford: resulta em caminhos mínimos entre uma origem e um destino com qualquer valor de custo nos arcos (negativos e não-negativos).

Algoritmo de Floyd-Warshall: resulta em caminhos mínimos entre todas as origens e destinos.

Algoritmo Label-Correcting: resulta em caminhos mínimos entre uma origem e todos os destinos.



O **Modified Label-Correcting Algorithm** é um algoritmo alternativo para obtenção de caminhos mínimos em uma rede.

Considere r_{ab} o risco no arco (a, b) entre o nó a e o nó b . O rótulo do nó l_a é o custo do nó inicial (raiz) até o nó a ao longo do caminho (mínimo) que os conecta e p_b é o nó predecessor do nó b conectado diretamente ao caminho.

Uma lista de nós predecessores (p_b) é atualizada de modo que os caminhos mínimos podem ser identificados ao final do algoritmo, exigindo que cada nó seja examinado pelo menos uma vez durante a execução do algoritmo.

Uma lista auxiliar denominada “Lista Sequencial” (*Sequence List - SL*) é criada para facilitar a implementação.



O **Modified Label-Correcting Algorithm** é dado por:

$l_i := 0; p_i := 0$

$SL := i$

$l_b := \infty \forall b \in \mathcal{N} - \{i\}; p_b := 0 \forall b \in \mathcal{N} - \{i\}$

Enquanto $SL \neq \emptyset$ faça

 Remova o elemento a de SL

Para cada arco (a, b) faça

Se $l_b > l_a + r_{ab}$ então

$l_b := l_a + r_{ab}$

$p_b := a$

Se $b \notin SL$ então

$SL := SL \cup b$

Fim se

Fim se

Fim Para

Fim Enquanto



O algoritmo inicia atribuindo-se 0 (zero) ao rótulo do nó inicial ($l_i = 0$) e inserindo-o na Lista Sequencial ($SL := \{i\}$).

Um valor grande (∞) é atribuído aos rótulos dos demais nós ($l_b := \infty \forall b \in \mathcal{N} - \{i\}$) e um valor nulo (zero) aos respectivos nós predecessores ($p_b := 0 \forall b \in \mathcal{N} - \{i\}$)

Cada iteração começa com a seleção e remoção de um nó a da lista sequencial (SL), tal que na primeira iteração o nó raiz é o único que está nessa lista e é o primeiro a ser analisado.

Para todos os nós j que podem ser alcançados a partir de a , se o rótulo de b é maior que o rótulo de a somado ao risco no arco ab (r_{ab}), então o rótulo de b é atualizado para $l_a + r_{ab}$ e o seu predecessor é atualizado para o nó a . Adicionalmente, o nó b é incluído na lista sequencial SL .

O algoritmo é executado até que SL fique vazia ($SL := \emptyset$).



**Algoritmo de Dijkstra e
Aplicações de Problemas de Caminho Mínimo**

Shortest Path Problem