

INFLUÊNCIA DA CHUVA NA PROBABILIDADE DE *BREAKDOWN*

Douglas Zechin

Daniel Rodrigues Acosta

Helena Beatriz Bettella Cybis

Departamento de Engenharia de Produção e Transportes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ricardo Abreu

Triunfo Concepa

RESUMO

O termo capacidade tem sido utilizado para descrever um valor determinístico que representa o volume máximo suportado por uma rodovia. Estudos apontam a importância de não se utilizar um único valor para a capacidade, mas sim o conceito de probabilidade de ocorrência de *breakdown*. Nesse artigo são comparadas as probabilidades de *breakdown* sob diferentes condições climáticas em uma rodovia. Para isso, são cruzados dados de detectores do tipo laço indutivo e dados de pluviômetros automáticos. São comparadas duas metodologias de identificação de *breakdown*. A melhor é utilizada para geração de curvas de probabilidade de *breakdown* por meio dos métodos PLM e máxima-verossimilhança com a distribuição de Weibull. Os resultados apresentam diferenças significativas entre as diferentes condições climáticas.

ABSTRACT

The term capacity has been used to describe a deterministic value that represents the maximum volume supported by a highway. Studies point to the importance of not using a single value for capacity, but rather the concept of probability of *breakdown* occurrence. In this work, *breakdown* probabilities under different climatic conditions on a highway are compared. For this, data of inductive loop type sensors and data of automatic rain gauges are combined. Two methodologies of *breakdown* identification are compared. The best is used to generate the *breakdown* probability curves by means of the Product Limit Method and the maximum-likelihood method with the Weibull distribution. The results stated that there is significant difference between the different climate conditions studied.

1. INTRODUÇÃO

O termo capacidade tem sido utilizado para descrever um valor determinístico que representa o volume máximo suportado por uma rodovia. Embora esse conceito tenha evoluído ao longo do tempo, a praticidade que a utilização de um único valor representa para tal fim acaba se sobrepondo aos problemas que essa definição apresenta (Brilon *et al*, 2005).

O HCM (2016), tem tratado a capacidade de uma rodovia como sendo “a taxa máxima de fluxo horário sustentável na qual pessoas ou veículos podem razoavelmente atravessar um ponto ou uma seção uniforme de uma faixa ou estrada durante um determinado período de tempo, sob condições predominantes de faixa, ambiente, tráfego e controle”. Essa definição é bastante vaga, desconsiderando a influência que condições externas à rodovias e inconstantes provocam na capacidade. Além disso, o HCM não traz orientações sobre como a capacidade deve ser medida em uma rodovia (Elefteriadou, 2014). Em sua versão mais recente, de 2016, foram acrescentadas a esta definição noções de capacidade que a relacionam com a ocorrência de *breakdown*.

As primeiras sugestões que dizem respeito à importância de não se utilizar um único valor para a capacidade foram feitas por Ponzlet (1996, *apud* Brilon *et al*, 2005). Nesse artigo foi sugerido o uso de valores de capacidade distintos para diferentes condições climáticas, períodos do dia e propósitos das rodovias. Em outros trabalhos foram observados diferentes valores de capacidade sob condições constantes (Elefteriadou *et al.*, 1995; Lorenz e

Elefteriadou, 2000; Persaud *et al.*, 1998), os quais motivaram o estudo de Brilon *et al.* (2005), o qual introduziu uma análise probabilística da capacidade.

Nesse artigo são analisados dados de detectores de tráfego e pluviométricos, a fim de se discutir a influência da chuva sobre a probabilidade de *breakdown*. Para isso, são apresentadas e aplicadas metodologias distintas de identificação de *breakdown* e de geração de curvas de probabilidade de *breakdown*.

2. METODOLOGIA

A definição mais atual de capacidade está diretamente ligada ao fenômeno do *breakdown*. Esse fenômeno pode ser entendido, em uma rodovia, como a queda de velocidade e volume resultante de um excesso de demanda que leva à transição do regime da rodovia de não-congestionado para congestionado. Uma vez que esse fenômeno ocorre em diferentes volumes, a capacidade passa a ser tratada como uma variável aleatória e seu valor a ser definido probabilisticamente. Ela pode ser relacionada a três períodos de interesse: (i) fluxo antes do *breakdown*, (ii) imediatamente antes do *breakdown* e (iii) fluxo observado durante o congestionamento. A escolha do período a ser avaliado depende dos propósitos de cada estudo (Elefteriadou *et al.*, 2006, *apud* Elefteridou, 2014).

Nessa seção são apresentadas metodologias para a identificação de *breakdowns*, bem como metodologias utilizadas para a geração de curvas de probabilidade de *breakdown* em função do volume. De posse delas e de dados meteorológicos, é possível traçar curvas de probabilidade distintas para situações de tempo seco e chuvoso, e analisar as diferenças existentes.

2.1. Métodos de identificação de *breakdown*

Um método adequado para identificação da ocorrência de *breakdown* é decisivo para o sucesso de um estudo. Existem diversas metodologias, dentre as quais deve ser escolhida e adaptada a mais apropriada às características específicas do tráfego sob análise. Nessa seção são apresentadas as duas metodologias empregadas no estudo.

2.1.1. Brilon (2005)

Como eventos de *breakdown* estão relacionados a uma redução significativa da velocidade, muitos estudos identificam eventos de *breakdown* por meio do estabelecimento de uma velocidade limite (Elefteriadou, 2014). Considera-se que ocorreu *breakdown* em um período i quando a velocidade cai para um patamar abaixo desta velocidade limite no período $i+1$. Esse patamar pode ser estabelecido observando-se séries temporais de velocidade e volume da via e identificando-se quedas abruptas da velocidade a um patamar característico de fluxo congestionado. Utiliza-se como velocidade limite um valor que não é verificado durante situações de fluxo não-congestionado e que geralmente caracteriza a transição para um regime congestionado.

Os dados advindos dos detectores são agrupados em intervalos de tempo, dispostos em ordem cronológica e cada intervalo recebe uma classificação segundo a condição de tráfego de *breakdown* {B}, fluxo livre {F} ou estado de congestionamento {C}, de acordo com os seguintes critérios (Brilon *et al.*, 2005):

{B}: o tráfego flui bem no intervalo de tempo i , mas a velocidade média cai para baixo da velocidade limite no período $i+1$, ou seja, ocorre o *breakdown*;

{F}: o tráfego flui bem nos intervalos de tempo i e $i+1$, indicando que a capacidade é maior que o volume observado em i .

{C}: o tráfego (i) está congestionado no intervalo de tempo i , ou seja, a velocidade está abaixo da velocidade limite ou (ii) observa-se um *breakdown* no intervalo i e um detector a jusante registra congestionamento no intervalo i ou $i-1$. Nesse caso se considera que o *breakdown* decorreu da fila gerada pelo outro congestionamento, e não das condições de tráfego do detector analisado. Esses dados devem ser descartados pois não carregam informações sobre a capacidade.

Os dados de tráfego devem ser agrupados em intervalos de tempo pequenos, geralmente 1 a 5 minutos, para que seja possível perceber as flutuações do tráfego (Brilon *et al.*, 2005). Brilon e Zurlinden (2003) concluíram que os dados de tráfego devem ser agregados em intervalos de 5 min para que essa metodologia produza bons resultados.

2.1.2. Lu e Elefteriadou (2013)

Nessa metodologia o *breakdown* é definido como cinco ou mais intervalos consecutivos de 1 min com uma queda média de velocidade maior que 16 km/h (Lu e Elefteriadou, 2013). Dessa forma, dispensa-se o uso de uma velocidade limite, imposto pela metodologia anterior. Embora esses critérios tenham sido elaborados para o estudo da capacidade de rodovias antes e durante acidentes, propõe-se utilizá-los para o cálculo da probabilidade de *breakdown*. Três critérios são adotados para identificar corretamente esse fenômeno:

- (i) A diferença de velocidade entre dois minutos consecutivos é negativa

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} < 0$$

- (ii) A velocidade média durante os 5 minutos anteriores é maior que a velocidade média nos 5 minutos seguintes por ao menos 16 km/h

$$\text{Média } \{S_{i-5}, \dots, S_{i-1}\} > \text{Média } \{S_i, \dots, S_{i+4}\} + 16 \text{ km/h}$$

- (iii) A máxima velocidade durante os 10 minutos seguintes é menor que a velocidade antes da queda de velocidade

$$\text{Máx } \{S_i, \dots, S_{i+9}\} < S_{i-1}$$

Em comparação com o método anterior, esse método não visa classificar os intervalos de tempo em {F} ou {C}, apresentando apenas ferramentas para a classificação do intervalo i quando ocorre do *breakdown*, {B}. Intervalos com fluxos inferiores a 1000 veic/h/faixa foram excluídos dessa parte da análise por se considerar que não estariam representando eventos de *breakdown*, mas sim flutuações decorrentes da variabilidade de velocidades em momentos de fluxo livre.

2.2. Métodos de cálculo da probabilidade de *breakdown*

Embora possa parecer razoável, a frequência com que eventos de *breakdown* ocorrem não pode ser utilizada para o cálculo da probabilidade de *breakdown*. É preciso levar em conta a probabilidade de que um certo volume seja observado, o que demanda tratamento matemático mais avançado (Elefteriadou *et al.*, 2011; Geistefeld e Brilon, 2009). Com base nisso, objetiva-se com esses métodos construir uma função de distribuição acumulada de capacidade, $F_c(q)$, a qual permita que se calcule a probabilidade de *breakdown* a partir do volume observado na via no intervalo i . Os métodos mais usuais utilizados para a construção dessa função são o Estimador Limite-Produto, ou Estimador de Kaplan-Meier, e o ajuste a

uma distribuição acumulada de Weibull através do método de máxima verossimilhança. Existem poucos estudos em português tratando desse assunto, portanto nesse artigo será adotada a nomenclatura usada internacionalmente para designar esses métodos, quais sejam PLM (*Product Limit Method*) e Weibull, respectivamente.

2.2.1. Product Limit Method

O PLM é um método estatístico de estimativa de sobrevivência (Kaplan e Meier, 1958). Suas principais aplicações estão associadas à duração de componentes mecânicos e à medicina, onde são avaliadas as taxas de sobrevivência de pessoas apresentado quadros clínicos específicos ou quando submetidas a novos tratamentos. Analogamente, o interesse da Engenharia de Transportes nesse método se refere à formulação de uma curva de probabilidade de não ocorrência de *breakdowns* (*sobrevivência* do tráfego) em função do volume na via, $S(q)$, ou de sua complementar curva de probabilidade de ocorrência do *breakdown* (*morte* do tráfego), $F(q) = 1 - S(q)$ (Brilon *et al.*, 2005; Elefteriadou *et al.*, 2011).

Esse método se mostra bastante preciso para volumes baixos, sendo especialmente útil, por exemplo, para o cálculo da probabilidade de *breakdown* em uma rodovia sujeita a diferentes fluxos nos acessos (Elefteriadou *et al.*, 2011). Nesses casos procura-se manter a probabilidade de *breakdown* em torno de 20% por meio de *ramp-metering*, técnica que visa controlar os volumes dos acessos com semáforos.

A função de sobrevivência descrita pelo PLM é dada por:

$$S(q) = \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, i \in \{B, F\} \quad (1)$$

em que q : fluxo (veic/h);

q_i : fluxo no intervalo de tempo i (veic/h);

k_i : número de intervalos de tempo com um volume $q \geq q_i$;

d_i : número de *breakdowns* com um fluxo q_i ;

$\{B, F\}$: conjunto de intervalos onde ocorreu *breakdown* ou onde o fluxo era não-congestionado.

A função de distribuição acumulada de capacidade é então dada por:

$$F_c(q) = 1 - S(q) = 1 - \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, i \in \{B, F\} \quad (2)$$

Essa função acumula em um valor entre 0 e 1. Ela somente atingirá o valor 1 quando o maior volume da amostra, $q_{\text{máx}}$, corresponder a um evento pertencente ao conjunto $\{B\}$, acumulando em $F_c(q_{\text{máx}}) < 1$, caso contrário (Brilon *et al.*, 2005).

O desvio padrão da função de sobrevivência $S(q)$ do PLM pode ser calculado pela fórmula (Greenwood, 1926):

$$\sigma_S(q) = S(q) \sqrt{\sum_{i:q_i \leq q} \frac{d_i}{n_i(n_i - d_i)}} \quad (3)$$

A partir do desvio padrão pode-se calcular o intervalo de confiança da função com:

$$F_c(q) - \frac{q_{(1+\gamma)}}{2} \cdot \sigma_S(q) \leq F_c(q) \leq SF_c(q) + \frac{q_{(1+\gamma)}}{2} \cdot \sigma_S(q) \quad (4)$$

em que z_p : quantil de ordem p da distribuição normal;
 γ : nível de confiança desejado.

2.2.2. Máxima Verossimilhança - Weibull

Como a probabilidade de *breakdown* nem sempre acumula em 100% segundo o PLM, é impossível verificá-la para alguns volumes. Para dar conta deste problema, utiliza-se o método da máxima verossimilhança para ajustar uma distribuição acumulada de Weibull aos dados (Brilon *et al.*, 2005). Para análise de capacidade a função de máxima verossimilhança é:

$$L = \prod_{i=1}^n f_c(q_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F_c(q_i)]^{1-\delta_i} \quad (5)$$

em que $f_c(q_i)$: função de densidade estatística da capacidade;
 $F_c(q_i)$: função de distribuição cumulativa da capacidade;
 n : número de intervalos de tempo;
 δ_i : 1, se o intervalo contém um valor não-censurado;
 δ_i : 0, se o intervalo contém um valor censurado.

Para fazer o ajuste, contudo, costuma-se utilizar a função de log-verossimilhança, L^* , uma vez que ela tem seu máximo com os mesmos parâmetros que a de máxima verossimilhança, mas é computacionalmente mais leve. Essa função é dada por:

$$L^* = \ln(L) = \sum_{i=1}^n \{\delta_i \cdot \ln[f_c(q_i)] + (1 - \delta_i) \cdot \ln[1 - F_c(q_i)]\} \quad (6)$$

Como função de distribuição da capacidade utiliza-se função de distribuição de Weibull:

$$F_c(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha} \quad (7)$$

em que $F_c(q)$: função de distribuição da capacidade;
 q : fluxo (veic/h);
 α : parâmetro de forma;
 β : parâmetro de escala (veic/h).

O parâmetro de forma α representa a variância da distribuição e fica entre 10 e 22 para a função de distribuição de capacidade de rodovias (Gesteifeld, 2009). Quanto maior esse valor, menor é a variância. Já o parâmetro β está diretamente relacionado à forma do problema, como o número de faixas.

3. ESTUDO DE CASO

O presente estudo relaciona dados de detectores (tipo laço indutivo) em quatro pistas da BR 290 (*Freeway*) localizados na região metropolitana de Porto Alegre - RS a três pluviômetros próximos a eles, para que o tráfego seja classificado de acordo com as condições climáticas. O pluviômetro mais distante em relação a seus detectores está a 3,78 km de distância, como pode ser visto na Figura 1. Trabalhos que fizeram análises semelhantes (Brilon e Ponzlet, 1996) usaram pluviômetros com distância entre 5 km e 20 km até seus respectivos detectores.



Figura 1: Localização dos detectores de tráfego e dos pluviômetros

Os detectores 1 e 4 se encontram à montante de gargalos existentes na via, o detector 2 se encontra à jusante e o detector 3 se encontra muito distante de qualquer gargalo. Espera-se que, pela metodologia adotada, sejam registrados eventos de *breakdown* nos detectores 1 e 4 e que não sejam registrados nos detectores 2 e 3.

Os dados dos detectores, fornecidos pela Concessionária Triunfo-Concepa, responsável pelo trecho estudado, referem-se a um ano de tráfego. Foram obtidos registrando-se a velocidade em km/h e o horário de passagem de cada veículo, com precisão de décimo de segundo.

O fluxo de veículos em uma autoestrada está sujeito a várias irregularidades que prejudicam o estudo do fluxo principal, sendo necessária a filtragem dos dados. Primeiramente foram retirados dados referentes a dias com VDM muito baixa, quando provavelmente ocorreu alguma falha no detector. Também foram removidos da base de dados períodos referentes a acidentes que obstruíram a via e períodos nos quais a Ponte móvel do Guaíba estava içada, causando retenção do tráfego a montante. Por fim, foram retiradas faixas dos detectores onde havia falhas de captura, de modo que o volume total da via não pode ser aferido em todos os detectores.

Eleftheriadou (2014) sugere que os detectores estejam localizados no acesso para que esse tipo de análise possa ser feito com sucesso. Detectores localizados a jusante dos conflitos tendem a não representar a região congestionada da nuvem, enquanto que detectores localizados a longas distâncias a montante não representam o fenômeno do *breakdown*, mas sim a queda de velocidade e volume decorrente da propagação da fila gerada por ele.

Dentre os detectores utilizados no estudo, os que mais se aproximam da condição ideal são o 1 e o 4, os quais apresentam congestionamentos de *breakdown* diariamente. O detector 1 está localizado imediatamente a montante de uma interseção tipo diamante e o detector 4 está localizado junto a um viaduto com vários pontos de conflito. Já os detectores 2 e 3 se situam em regiões onde não são registrados gargalos que possam gerar *breakdowns*. De todo modo, todos os detectores são analisados afim de se estudar os resultados apontados por essa metodologia.

Os dados dos pluviômetros foram obtidos da base de dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden). Consistem em registros de precipitação em mm a cada hora, com intervalos de aquisição mais curtos para eventos de chuva, até um mínimo de 10 minutos.

3.1. Compatibilização dos dados de tráfego e pluviométricos

Os dados de tráfego foram agregados em intervalos de tempo condizentes com os métodos de identificação de *breakdown* descritos na Metodologia (1 min e 5 min), gerando dois bancos de dados distintos. A velocidade média da via foi calculada através da média aritmética as velocidades instantâneas observadas em todas as faixas; o fluxo foi definido através da contagem de veículos passando pelos detectores e a densidade foi calculada pela divisão do fluxo observado no intervalo de tempo pela velocidade média observada.

Os dados pluviométricos receberam classificação binária, 1 ou 0, conforme estivesse ou não chovendo, respectivamente, no intervalo de medição fornecido. Eles foram então concatenados com os bancos de dados de tráfego, os quais receberam o binário observado no mesmo período no banco de dados da chuva.

3.2. Escolha da metodologia de identificação de *breakdowns*

As duas metodologias apresentadas foram aplicadas a uma das localidades para que se pudesse escolher a mais adequada para a sequência do estudo. O detector 1 foi utilizado para esses testes.

O método de Lu e Elefteriadou foi aplicado de modo que todos os intervalos de tempo i que precedem *breakdowns* fossem identificados. Estes pontos foram inseridos no conjunto de pontos {B}, enquanto os 10 pontos anteriores a eles foram inseridos no conjunto de pontos {F} (Elefteriadou, 2014).

O método de Brilon *et al* foi aplicado estabelecendo-se primeiramente a velocidade limite. Alguns autores utilizam técnicas mais aprimoradas para definição desse patamar, como a clusterização (Riente e Setti, 2014); contudo, como foram analisados poucos detectores, optou-se por defini-lo visualmente. Nesse caso, o valor utilizado foi 78 km/h.

Os pontos pertencentes aos conjuntos {B} e {F} foram então classificados como “seco” ou “chuva” de acordo com a condição climática no intervalo de tempo correspondente. A Figura 2 mostra o resultado da aplicação de ambas as metodologias.

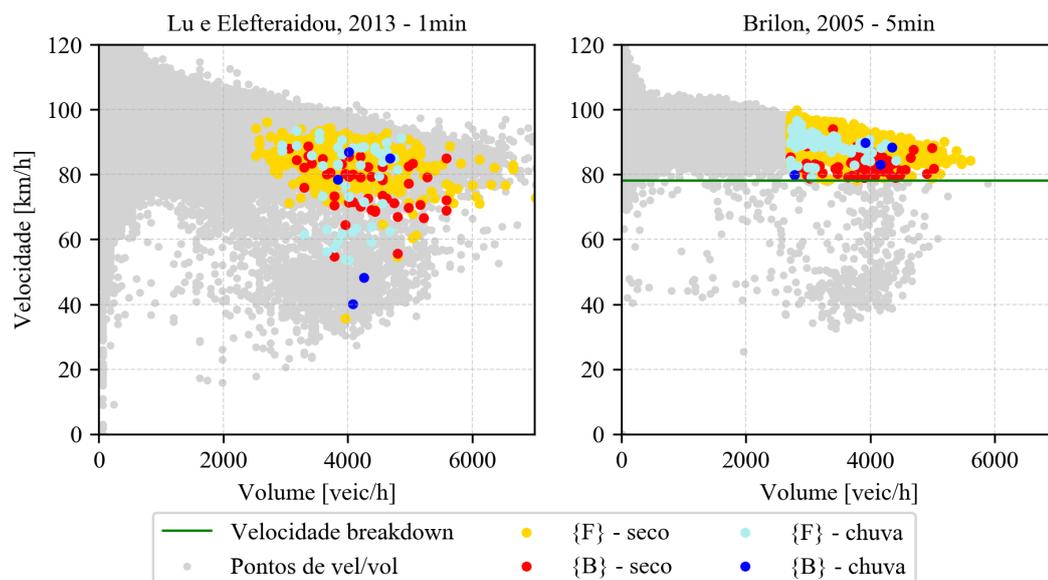


Figura 2: Comparação entre os métodos de identificação de *breakdown*

A metodologia de Lu e Eleftriadou identificou 5 ocorrências de *breakdown* sob chuva e 50 sob tempo seco. A metodologia de Brilon *et al* identificou 4 ocorrências de *breakdown* sob chuva e 74 sob tempo seco. Embora a quantidade de ocorrência seja próxima, observa-se que as condições nas quais ocorreram são diferentes. Enquanto que na metodologia de Brilon *et al* as ocorrências ficam limitadas ao patamar de velocidade estabelecido e por conta disso partem obrigatoriamente de uma condição de fluxo não-congestionado, na metodologia de Lu e Eleftriadou são identificados *breakdowns* na região de transição entre o regime de fluxo livre e o congestionado, e até mesmo na região congestionada. Por conta disso optou-se por utilizar o método de Brilon *et al* nas etapas posteriores do estudo.

3.3. Probabilidade de *breakdown* pelo PLM

A probabilidade de *breakdown* pode ser verificada a partir dos métodos PLM e Weibull, descritos na metodologia desse artigo. Os bancos foram então separados segundo a presença de chuva, gerando dois bancos diferentes, um “seco” e um “chuva”, para cada detector. Prosseguiu-se com os conjuntos {B} e {F} resultantes dessa metodologia e os dados pertencentes ao conjunto {C} foram excluídos. Os bancos de dados gerados com cada um dos detectores foram submetidos ao método de Brilon *et al* (2005), escolhido como mais eficiente na seção anterior. O PLM foi então aplicado em cada um dos bancos e os resultados dos detectores 1 e 4 são apresentados na Figura 3, com um intervalo de confiança de 95%. Os demais detectores não apresentam congestionamentos com tanta frequência por estarem localizados distante de gargalos e geram curvas de probabilidade de *breakdown* sem significado, sendo, portanto, omitidas.

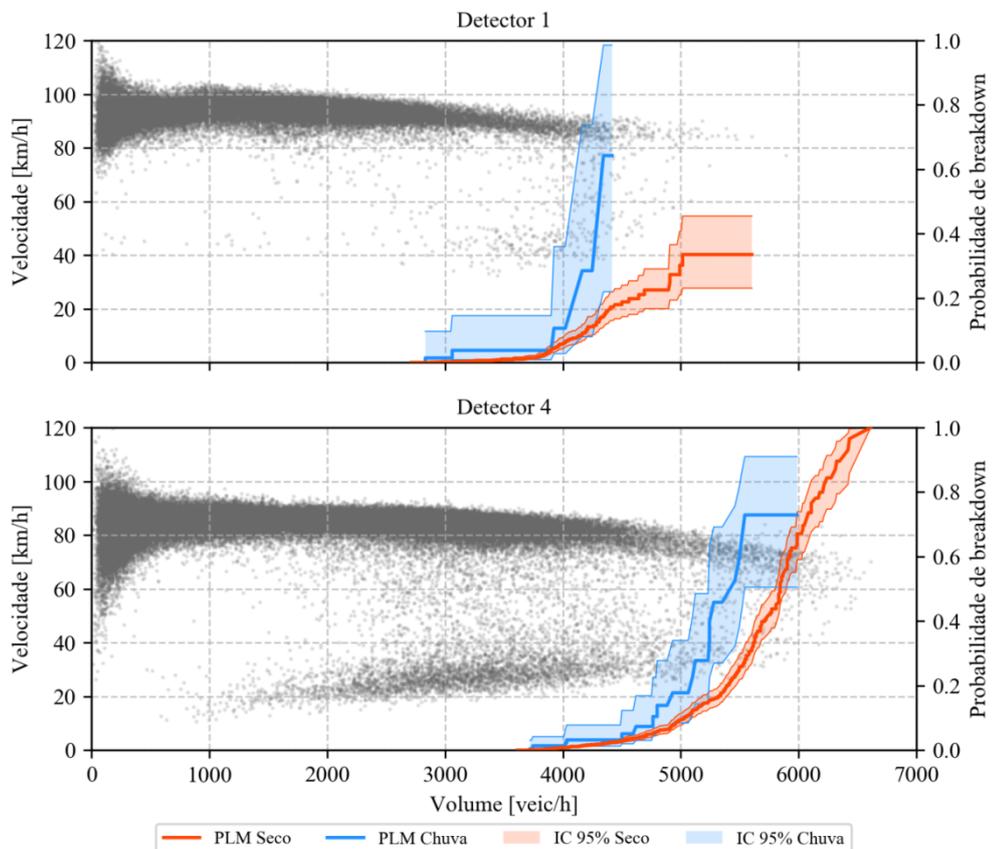


Figura 3: Dados de velocidade-fluxo e método PLM

Como esperado, o detector 4 apresentou a melhor caracterização da curva de probabilidade de *breakdown* por estar na localidade mais propícia para a identificação desse evento. O detector 1 possui localização menos privilegiada para o estudo, apresentando menos pontos de *breakdown* e curva de probabilidade menos consistente.

Os intervalos de confiança das curvas de chuva e de tempo seco indicam que, de modo geral, existe diferença estatisticamente significativa entre elas. As sobreposições dos intervalos de confiança em volumes baixos indica que esses volumes não são suficientes para que exista diferença na probabilidade de *breakdown*. As sobreposições em volumes maiores é esperada e decorre do tamanho dos intervalos de confiança, os quais estão relacionados à frequência de pontos disponíveis e não invalida o estudo.

A partir dos gráficos apresentados pode-se comparar as probabilidades de *breakdown* para um mesmo volume ou o volume relacionado a uma probabilidade de *breakdown* fixa. Observa-se que a probabilidade de *breakdown* sob chuva foi maior que a com tempo seco para todos os volumes registrados. As curvas indicam probabilidades similares para volumes baixos e divergem conforme os volumes aumentam.

O método PLM, portanto, não permite que sejam feitas aferições precisas em relação à probabilidade de *breakdown* em volumes muito altos, e essa é uma das principais críticas feitas a esse método. A aferição das probabilidades de *breakdown* para volumes mais altos pode ser feita através do ajuste dos dados a uma distribuição como a de Weibull.

3.4. Probabilidade de *breakdown* pela distribuição de Weibull

Como esperado, as distribuições sob análise rejeitam a hipótese nula de que venham de uma distribuição normal e são melhor ajustadas à distribuição de Weibull (Modi *et al.*, 2005; Brilon *et al.*, 2005). O ajuste à distribuição de Weibull permite que as probabilidades sejam extrapoladas e que se calcule analiticamente o volume correspondente a qualquer probabilidade. Na Figura 4 são apresentadas as distribuições de Weibull encontradas para os detectores 1 e 4 juntamente com o PLM.

As diferenças observadas pelo PLM ficam ainda mais evidentes pela distribuição de Weibull. Mesmo que alguns dos detectores não estejam localizados no local ideal para identificação de *breakdown*, observa-se que as probabilidades envolvidas com a chuva são sempre superiores às com tempo seco.

A capacidade da rodovia, assumindo-se um valor constante para fins de comparação, pode ser inferida a partir da distribuição de Weibull (Geistefeld, 2011; Washburn *et al.*, 2010 *apud* Riente e Setti, 2014). Sugere-se utilizar o volume relativo a uma probabilidade entre 3% e 4%. Nesse estudo utilizou-se 4%. A Tabela 1 mostra as capacidades encontradas para cada um dos detectores e as diferenças existentes entre as situações com tempo seco e com chuva.

As diferenças percentuais observadas entre os detectores se devem à localização dos mesmos. Quando eles se encontram próximos de gargalos, as curvas de probabilidade de *breakdown* tendem a ser mais verticais e próximas horizontalmente, evidenciando o fato de que existe alta probabilidade de *breakdown* em volumes factíveis. Quando eles se encontram distantes de gargalos, ocorre o contrário e as diferenças de capacidade são maiores.

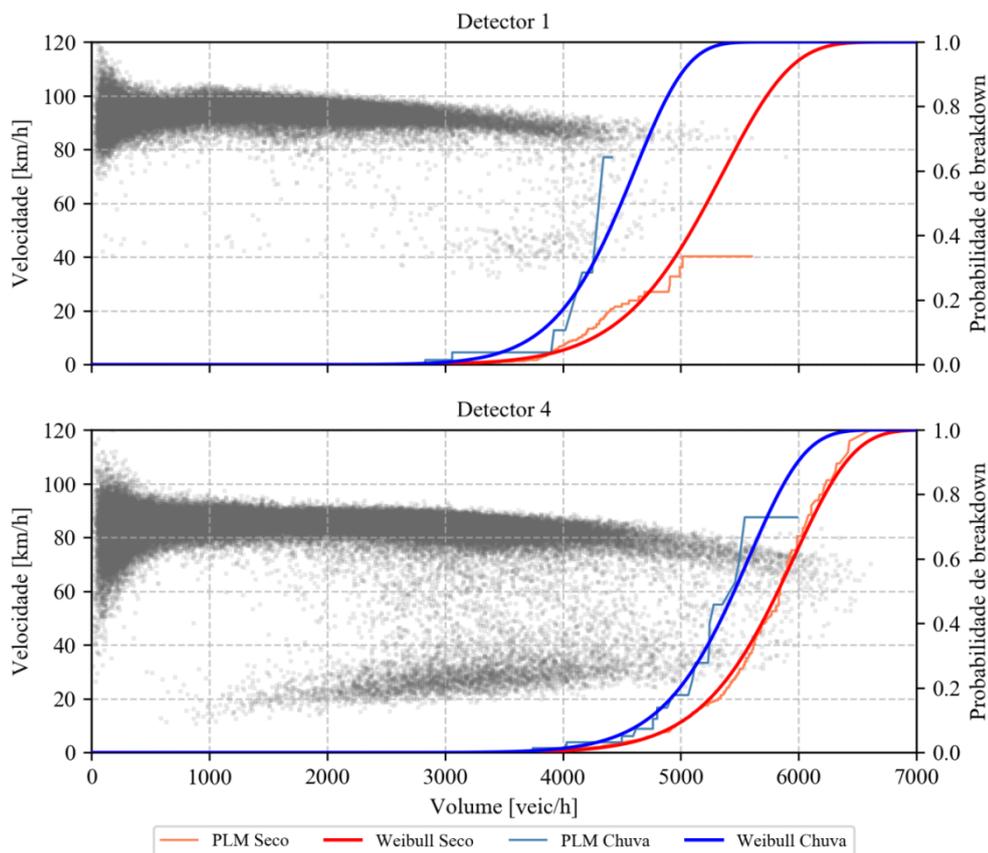


Figura 4: Dados de velocidade-fluxo, método PLM e método Weibull

Tabela 1: Comparação entre as capacidades com tempo seco e com chuva

Detector	Volume a 4% de probabilidade de <i>breakdown</i> (veic/h)		Diferença (veic/h)	Diferença %
	Seco	Chuva		
Nº 1	3.953,34	3.492,45	460,89	11,66%
Nº 4	4.663,53	4.368,18	295,35	6,33%

4. CONCLUSÃO

Nesse estudo foram comparadas as probabilidades de *breakdown* sob diferentes condições climáticas em uma rodovia. Para isso, foram confrontadas duas metodologias de identificação de *breakdown* e a melhor foi utilizada para geração da curva de probabilidade de *breakdown* por meio dos métodos PLM e máxima-verossimilhança com a distribuição de Weibull.

A metodologia de identificação de *breakdown* apresentada por Brilon *et al* (2005) se mostrou mais eficiente e coerente que a apresentada por Lu e Elefteriadou (2013) para os fins específicos desse artigo. A metodologia de Lu e Elefteriadou apresenta 3 critérios genéricos, mais complexos e subjetivos, sendo inviável que sejam calibrados para cada detector em estudos longos. Já a utilização de uma velocidade limite é mais ajustável e compreensível, podendo ser identificada com boa especificidade para cada detector.

O PLM indicou que existe diferença significativa entre a probabilidade de *breakdown* com e sem chuva. Essa metodologia se mostra bastante eficiente para a identificação de probabilidade para volumes menores, sendo ideal para a aplicação conjunta a *ramp-meterings*, a fim de se controlar volumes de acesso e minimizar a probabilidade de *breakdown*. Os

intervalos de 95% de confiança, contudo, indicaram que existe uma incerteza maior para volumes maiores. Isso decorre do fato de que a frequência de observações em volumes maiores é menor, especialmente em relação à chuva, que, por si só, é menos frequente que o tempo seco. Para contornar esse problema, indica-se a utilização de períodos de dados maiores, o que foi inviável para esse estudo.

O ajuste dos dados à distribuição de Weibull explicitou as diferenças existentes entre as duas situações climáticas e permitiu que pudessem ser calculadas as probabilidades de *breakdown* para todos os volumes. As curvas de probabilidade de *breakdown* de detectores distantes de gargalos evidenciam o fato de que essa metodologia não é adequada para o cálculo da capacidade nesses casos. As diferenças de capacidade e de probabilidade encontradas nos detectores próximos a gargalos indicam que as operadoras de rodovias devem estar atentas à influência da chuva no tráfego, especialmente em localidades onde ela é bastante incidente.

Recomendações para trabalhos futuros se concentram na indicação de que um conjunto de dados maior seja utilizado para que possam ser feitas, por exemplo, curvas de probabilidade de *breakdown* distintas para diferentes intensidades de chuva e levando em conta o período do dia. Metodologias mais robustas também podem ser utilizadas para a definição de valores determinísticos de capacidade (Kondyli *et al.*, 2013; Modi *et al.*, 2014; Van Aerde e Rakha, 1995).

Agradecimentos

Agradecemos à empresa Triunfo Concepa pelos dados de tráfego fornecidos, especialmente ao Sr. Arleu Campos por sua disponibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brilon, W., Geistefeldt, J., e Regler, M. (2005) Reliability of Freeway Traffic Flow: A stochastic Concept of Capacity. *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*.
- Brilon, W. e Ponzlet, M. (1996) Variability of speed-flow relationships on German autobahns. *Transportation Research Record*, n. 1555, p. 91-98.
- Brilon, W. e Zurlinden, H. (2003) *Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen*. Bundesministerium für Verkehr, Bau-und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr. Alemanha.
- Elefteriadou, L., Hall, F., Brilon, W., Roess, R. e Romana, M. (2006) Revisiting the definition and measurement of capacity. *5th International symposium on highway capacity and quality of service*, Yokohama, Japão.
- Elefteriadou, L. (2014) *An Introduction to Traffic Flow Theory*. Ed. Springer
- Elefteriadou, L., Kondyli, A., Washburn, S., Brilon, W., Lohoff, J., Jacobson, L., Hall, F., e Persaud, B. (2011) Proactive ramp management under the threat of freeway-flow breakdown. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 23, p. 4-14.
- Elefteriadou, L., Roess, R. P., e McShane, W. R. (1995) Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions. *Transportation Research Record*, n. 1484, 80–89.
- Geistefeldt, J. (2011) Empirical Relation Between Stochastic Capacities and Capacities Obtained from the Speed-Flow Diagram. *Transportation Research Circular E-C149: 75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, EUA.
- Geistefeldt, J. e Brilon, W. (2009) *A comparative assessment of stochastic capacity estimation methods*. Transportation and Traffic Theory: Golden Jubilee. Springer, Boston, EUA.
- Greenwood, M. (1926) A Report on the Natural Duration of Cancer. *Reports on Public Health and Medical Subjects*. Ministry of Health, n. 33.
- Highway Capacity Manual (2010). Transportation Research Board, National Research Council, Washington, EUA.
- Kaplan, E. L., e Meier, P. (1958) Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*, v. 53, n. 282, p. 457-481.
- Kondyli, A., Elefteriadou, L., Brilon, W., Hall, F. L., Persaud, B., e Washburn, S. (2013) Development and Evaluation of Methods for Constructing Breakdown Probability Models. *American Society of Civil*

- Engineers*, v. 139 (Setembro), p. 931–940.
- Lorenz, M., e Elefteriadou, L. (2000) A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown. *Transportation Research Circular*, (E-C018), p. 84–95.
- Lu, C., e Elefteriadou, L. (2013) An investigation of freeway capacity before and during incidents. *Transportation Letters*, v. 5, n. 3, p. 144–153.
- Modi, V., Kondyli, A., Washburn, S. S., e McLeod, D. S. (2014) Freeway Capacity Estimation Method for Planning Applications. *Journal of Transportation Engineering*, v. 140, n. 9.
- Persaud, B., Yagar, S. e Brownlee, R. (1998) Exploration of the Breakdown. *Transportation Research Record*, n. 1634, p. 64–69.
- Ponzlet, M. (1996) *Dynamik der Leistungsfähigkeiten von Autobahnen*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, n. 16. Alemanha.
- Riente, G. e Setti, A. J. R. (2014) *Speed–Flow Relationship and Capacity for Expressways in Brazil*. Innovative Applications of the Highway Capacity Manual 2010, p. 10.
- Van Aerde, M., e Rakha, H. (1995) Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships. *Pacific Rim TransTech Conference. Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings. 6th International VNIS. A Ride into the Future*, p. 334–341.
- Washburn, S. S., Y. Yin, V. Modi, e A. Kulshrestha (2010) *Investigation of Freeway Capacity, Part B: Freeway Capacity Estimation for Florida Freeways, Final Report*. Transportation Research Center, University of Florida, Tallahassee, EUA.

Douglas Zechin (douglaszechin@gmail.com)
Daniel Rodrigues Acosta (daniel.acosta@ufrgs.br)
Helena Beatriz Bettella Cybis (helenabc@producao.ufrgs.br)
Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha 99 – Porto Alegre, RS, Brasil

Ricardo Abreu (ricardo.abreu@triunfoconcepa.com.br)
Triunfo Concepa
R. Voluntários da Pátria, 4813 – Porto Alegre, RS, Brasil