

Evitabilidade em acidentes de trânsito: Proposta de uma análise dinâmica sob a perspectiva do tempo.

M. L. B. Silva ^{a,*}

^a Instituto de Criminalística, Departamento de Polícia Técnico Científica, Rio Branco (AC), Brasil

*Endereço de e-mail para correspondência: peritomarcoslourenco@gmail.com. Tel.: +55-68-99205-5890.

Recebido em 19/01/2026; Revisado em 06/03/2026; Aceito em 30/03/2026

Resumo

A análise da evitabilidade em perícias de acidente de trânsito é amplamente utilizada para avaliar a influência da velocidade na ocorrência do evento, sendo tradicionalmente fundamentada na comparação entre distância de percepção do perigo e a distância necessária para a parada do veículo. Contudo, essa abordagem baseia-se predominantemente em relações espaciais, podendo não representar integralmente a natureza dinâmica das colisões. O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de análise da evitabilidade baseada na comparação dos tempos de deslocamento dos veículos até a região de conflito, incorporando a variável tempo como elemento central. Para isso, os tempos de interceptação foram tratados como variáveis aleatórias e modelados por distribuições probabilísticas obtidas por simulação de Monte Carlo, permitindo avaliar a coincidência espaço-temporal entre os envolvidos. A metodologia foi aplicada a casos reais de ocorrências de trânsito, sendo os resultados comparados com aqueles obtidos pela abordagem espacial tradicional. Verificou-se que a análise espaço-temporal permite identificar situações em que trajetórias espacialmente conflitantes não resultariam em colisão quando consideradas sob a ótica temporal, além de possibilitar avaliar a influência do excesso de velocidade na formação da condição de conflito. Conclui-se que a abordagem proposta estabelece um critério baseado na coincidência espaço-temporal, proporcionando uma interpretação mais consistente da dinâmica dos acidentes ao incorporar explicitamente esta coincidência como condição necessária para a ocorrência da colisão.

Palavras-Chave: Perícia; Criminalística; Trânsito; Velocidade; Evitabilidade.

Abstract

The analysis of avoidability in traffic accident investigations is widely used to assess the influence of speed on the occurrence of the event, traditionally based on a comparison between the distance of danger perception and the distance required for the vehicle to stop. However, this approach is predominantly based on spatial relationships and may not fully represent the dynamic nature of collisions. This work aims to propose a methodology for analyzing avoidability based on the comparison of the travel times of vehicles to the conflict zone, incorporating the time variable as a central element. To this end, interception times were treated as random variables and modeled by probability distributions obtained through Monte Carlo simulation, allowing for the evaluation of spatiotemporal coincidence between the parties involved. The methodology was applied to real cases of traffic incidents, and the results were compared with those obtained by the traditional spatial approach. It was found that spatiotemporal analysis allows the identification of situations in which spatially conflicting trajectories would not result in a collision when considered from a temporal perspective, in addition to making it possible to assess the influence of excessive speed on the formation of the conflict condition. It is concluded that the proposed approach establishes a criterion based on spatiotemporal coincidence, providing a more consistent interpretation of accident dynamics by explicitly incorporating this coincidence as a necessary condition for the collision to occur.

Keywords: Expertise; criminalistics; traffic; speed; avoidability.

1. INTRODUÇÃO

O cálculo da velocidade de veículos constitui um dos elementos centrais nas perícias de acidentes de trânsito, uma vez que a energia cinética associada à velocidade de circulação está diretamente relacionada à magnitude dos danos materiais e à gravidade das lesões sofridas pelas vítimas, podendo resultar, em muitos casos, em consequências fatais. Nesse contexto, a determinação da velocidade e a análise das implicações decorrentes do seu eventual excesso desempenha papel fundamental na reconstrução da dinâmica dos sinistros e na elucidação de suas circunstâncias.

Além da estimativa da velocidade, outro aspecto que tem ganhado crescente relevância nas perícias de acidentes de trânsito no Brasil é a avaliação da possibilidade de evitar a ocorrência, usualmente denominada análise de evitabilidade. Esse conceito passou a ser incorporado de forma sistemática aos laudos periciais, sendo frequentemente objeto de quesitos complementares quando não abordado explicitamente na análise técnica.

Na literatura pericial brasileira, diversos autores abordam a análise da evitabilidade a partir da relação entre a posição inicial dos veículos envolvidos e a região de colisão. Nesse contexto, destacam-se os trabalhos de Almeida, 2014 [1], Aragão, 2016 [2], Negrini Neto; Kleinubing, 2023 [3], bem como Toresan Jr., 2024 [4], que tratam do tema principalmente mediante a análise das distâncias percorridas e da capacidade de parada dos veículos antes do ponto de impacto, aqui denominada de metodologia espacial.

Entretanto, as colisões de trânsito constituem fenômenos essencialmente dinâmicos, nos quais espaço e tempo estão intrinsecamente associados. Dessa forma, análises baseadas exclusivamente na relação espacial entre os veículos podem não contemplar integralmente a dinâmica temporal que determina a ocorrência efetiva do conflito no ponto de colisão.

A metodologia espacial de análise de evitabilidade pressupõe, necessariamente, a ocorrência de uma ação ou reação por parte do condutor do veículo em excesso de velocidade, a fim de avaliar a possibilidade de evitar o evento. Uma ocorrência que poderia ser considerada inevitável, sob uma análise exclusivamente baseada nas distâncias percorridas, poderia ser classificada como evitável quando analisada sob a perspectiva conjunta de espaço e tempo, a partir da comparação dos tempos necessários para que ambos os veículos atinjam o ponto de conflito, e não somente utilizando a variável tempo para determinar o posicionamento do veículo principal no espaço.

Assim, o presente artigo propõe uma metodologia temporal de análise de evitabilidade a qual está baseada

na comparação entre a velocidade real de circulação dos veículos e a velocidade máxima regulamentada para a via, por meio da avaliação do tempo de deslocamento dos veículos envolvidos até a região de colisão. Essa metodologia independe da existência de uma reação do condutor, podendo ser analisada a partir da hipótese de circulação dos veículos dentro dos limites de velocidade regulamentados para a via.

Diferentemente da abordagem tradicional, a metodologia proposta não se limita a complementar a análise espacial, mas estabelece um critério próprio baseado na coincidência espaço-temporal como condição física necessária para a ocorrência da colisão.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

A ocorrência de uma colisão entre veículos pode ser interpretada, do ponto de vista físico, como a situação em que dois corpos tentam ocupar simultaneamente a mesma região do espaço, entretanto, de acordo com o princípio da impenetrabilidade da matéria [5], dois corpos não podem ocupar o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo. Assim, uma colisão somente ocorre quando as trajetórias dos veículos são conflitantes tanto no espaço quanto no tempo, sendo a análise conjunta dessas variáveis compatível com a natureza dinâmica dos acidentes de trânsito.

Em análises de dinâmica de tráfego e reconstrução de acidentes, a avaliação da possibilidade de interação entre veículos pode ser feita sob a perspectiva de dois conceitos *Time to Collision* (TTC) [6], aplicado a situações de aproximação ao longo de uma mesma trajetória e *Time to Interception* (TTI), particularmente adequado para cenários em que dois veículos se deslocam em trajetórias distintas que convergem para um mesmo ponto. Este conceito representa o tempo necessário para que os veículos alcancem um determinado ponto do espaço, geralmente associado a uma zona de conflito, como ocorre em cruzamentos viários, onde a ocorrência de colisão depende da coincidência temporal entre os instantes em que cada veículo alcança a região de possível interação espacial [7], [8].

Matematicamente, o tempo de interceptação pode ser expresso por:

$$TTI = \frac{d}{v}$$

onde:

- d representa a distância entre o veículo e o ponto de conflito;
- v corresponde à velocidade de deslocamento do veículo.

Assim, para dois veículos que se deslocam em direção a um mesmo ponto, obtêm-se dois tempos de

intercepção distintos, os quais representam os instantes previstos de chegada de cada veículo à região de conflito.

A possibilidade de interação física entre os veículos depende da proximidade temporal entre esses tempos de chegada. Caso os tempos de intercepção sejam significativamente distintos, um dos veículos terá atravessado a região antes da chegada do outro, não havendo possibilidade de ocupação simultânea do espaço. Por outro lado, quando os tempos são suficientemente próximos, torna-se fisicamente possível que ambos concorram pela mesma região espacial em um intervalo temporal compatível com o evento de colisão, em consonância com o princípio da impenetrabilidade da matéria [5].

Em análises periciais, entretanto, as grandezas envolvidas — especialmente velocidades e distâncias — apresentam incertezas inerentes aos processos de medição e reconstrução. Consequentemente, os tempos de intercepção não devem ser tratados como valores determinísticos únicos, mas sim como variáveis aleatórias, cuja dispersão pode ser representada por distribuições estatísticas.

Nesse contexto, a modelagem por distribuições normais (gaussianas) constitui uma abordagem adequada para representar a variabilidade associada aos tempos de intercepção. Cada veículo passa a ser descrito por uma distribuição probabilística de tempos de chegada ao ponto de conflito, caracterizada por uma média e um desvio padrão [9].

A análise da interseção entre essas distribuições permite avaliar a região de coincidência temporal entre os tempos de intercepção dos veículos, representando a faixa de instantes em que ambos podem alcançar a zona de conflito de forma simultânea ou suficientemente próxima para possibilitar interação física.

Essa abordagem permite incorporar explicitamente as incertezas associadas às variáveis do problema, oferecendo uma representação probabilística do cenário investigado. Dessa forma, a análise gaussiana dos tempos de intercepção constitui uma extensão estatística natural do conceito de *Time to Interception*, permitindo avaliar de forma quantitativa a possibilidade de coincidência temporal entre os veículos envolvidos.

3. MÉTODO DE ANÁLISE TEMPORAL

Para verificação da aplicabilidade da metodologia temporal de análise de evitabilidade, o presente trabalho realizou estudos de casos de ocorrências de trânsito atendidas pela perícia criminal do Estado do Acre, nos quais foram identificados veículos em excesso de velocidade (veículo principal) e a análise espacial resultou não evitável. Além disso, foi selecionado um caso cuja análise de evitabilidade não fora realizada.

Os tempos de intercepção associados a cada veículo dos casos em análise foram tratados como variáveis aleatórias, em virtude das incertezas inerentes às estimativas de velocidade e distância obtidas na reconstrução do evento. Sua variabilidade foi obtida por simulação e posteriormente representada por uma distribuição normal caracterizada por sua média e desvio padrão, permitindo descrever a variabilidade estatística dos instantes de chegada ao ponto de conflito. A representação gráfica dessas distribuições gaussianas permitiu visualizar a região de coincidência temporal entre os tempos de intercepção dos veículos.

O método proposto neste artigo analisou o tempo de deslocamento do veículo principal desde o ponto de percepção até a região de colisão, associado ao tempo de deslocamento do veículo secundário, não somente até a região de colisão, mas considerando sua movimentação mesmo após passar por ela.

De acordo com os princípios da cinemática clássica, embora a distância entre o ponto de percepção e a região de colisão permaneça a mesma, a variação da velocidade altera o tempo necessário para percorrer esse trecho. De modo que, ao se atribuir ao veículo principal uma velocidade inferior àquela efetivamente desenvolvida e/ou um processo de desaceleração por frenagem, o tempo de deslocamento passa a ser variável e inversamente relacionado à velocidade, tanto no Movimento Retilíneo Uniforme (MRU) quanto no Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV).

Assim, por mais que o condutor do veículo principal não consiga imobilizar o seu veículo na distância disponível transitando com a velocidade máxima da via, ele percorrerá esse trecho em um tempo superior ao percorrido com a velocidade real de circulação e isso pode ser determinante para a evitabilidade de um acidente de trânsito.

Para a comparação entre os tempos de chegada dos veículos ao sítio de colisão é necessário conhecer suas velocidades e analisar se suas trajetórias seriam conflitantes no mesmo tempo e espaço, pois, embora as trajetórias possam ser conflitantes no espaço (metodologia espacial) podem não ser conflitantes na comparação de tempo, o que também tornaria o evento evitável.

A análise temporal pode, ainda, ser aplicada para avaliar a possibilidade de o acidente ocorrer ou não, caso o limite de velocidade máxima da via seja respeitado, mesmo sem exigir uma (re)ação por parte dos condutores, avaliando apenas o tempo em que cada veículo passaria pela região de colisão.

Para avaliação do método aqui proposto foram utilizadas as equações do Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV) e do Movimento Retilíneo Uniforme (MRU):

$$V = V_0 + a \cdot t \quad (1)$$

$$S = S_0 + V_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (2)$$

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S \quad (3)$$

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde:

V: Velocidade calculada em um determinado período de espaço e tempo (m/s);

V₀: Velocidade inicial do veículo (m/s);

a: Aceleração do veículo que, em caso de desaceleração (frenagem), assume valor negativo (m/s²);

t: Tempo (s);

S: Medida de distância que se deseja saber após um período em processo de aceleração/desaceleração com uma determinada velocidade inicial (m);

S₀: Medida de distância inicial (m);

ΔS: Variação da medida de distância, expressa por “S-S₀” (m), e;

Δt: Variação do intervalo de tempo, expressa por “t-t₀” (s).

3.1. Critérios para a utilização do método temporal

A metodologia temporal pode ser aplicada para a análise de colisão entre veículos com e sem processo de desaceleração, bem como para ocorrências de atropelamento, a fim de analisar a evitabilidade decorrente do excesso de velocidade. Constituem-se critérios de aplicação:

- Identificar o sítio de colisão;
- Conhecer a velocidade de tráfego dos veículos envolvidos;
- Possibilidade de estimar a velocidade do pedestre, em casos de atropelamento;
- Conhecer a velocidade máxima permitida para o local (velocidade questionada);
- Não ocorrência de manobras evasivas ou desvios direcionais por parte dos condutores;
- Conhecer a região do veículo em que se deu a colisão em relação às suas medidas de comprimento e/ou largura.

3.2. Método espacial x método temporal

A metodologia espacial usualmente empregada na análise da evitabilidade de acidentes de trânsito baseia-se predominantemente em uma comparação entre a distância do ponto de percepção do perigo e a região de colisão com a distância necessária para a parada do veículo. Nessa abordagem, caso a distância necessária para a

parada completa seja superior à distância disponível, conclui-se que o acidente seria inevitável sob aquela condição de circulação. Esta análise assume, implicitamente, a região de colisão como um ponto fixo no espaço, não avaliando a evolução temporal de todos os envolvidos.

Entretanto, na prática, dois veículos podem possuir trajetórias espacialmente conflitantes, mas atravessar a região de conflito em instantes distintos, sem que ocorra colisão. Assim, em muitas ocorrências envolvendo trajetórias convergentes, a própria região de colisão é determinada pela interação dinâmica entre os veículos, dependendo da evolução temporal de suas posições.

O método temporal, ora proposto, introduz uma análise espaço-temporal, avaliando simultaneamente a posição e o tempo de deslocamento dos veículos envolvidos, tornando possível verificar se os veículos efetivamente ocupam o mesmo ponto do espaço no mesmo instante, condição necessária para a ocorrência da colisão. Além disso, ele permite avaliar situações em que a análise exclusivamente espacial possa indicar inevitabilidade, enquanto a análise temporal demonstra ausência de coincidência na região de conflito.

As abordagens espacial e temporal baseiam-se em fundamentos distintos, sendo a primeira centrada na capacidade de parada e a segunda na verificação da coincidência espaço-temporal, no entanto, é necessário estabelecer condições de aplicação do método temporal no contexto da análise pericial (**Tabela 1**):

- Quando o evento for analisado e constatado que é evitável pela análise espacial (DTQ < DSC), não se faz necessária a análise temporal, pois já existe solução física válida para evitar a ocorrência nas condições consideradas;

- Quando o evento for precedido de desaceleração conhecida e a análise espacial apontar que a ocorrência não é evitável (DTQ ≥ DSC), admite-se a aplicação da análise temporal para verificar a coincidência espaço-temporal entre os envolvidos;

- Quando o evento não for precedido por desaceleração é possível realizar a análise temporal de duas maneiras: (i) sem que seja proposto uma reação por parte do condutor. Nesses casos é realizada uma comparação entre o tempo de deslocamento referente a velocidade de tráfego e a velocidade questionada utilizando as equações do MRU. (ii) considerando que seria possível uma reação por parte do condutor de acordo com os parâmetros de percepção e reação, utilizando as equações do MRUV.

Tabela 1. Comparativo entre os métodos espacial e temporal.

Método Espacial			Método Temporal		
Resultado	Análise	Conclusão	Resultado	Análise	Conclusão
$DTQ < DSC$	Vp para antes do SC	Evitável	N/A	Não aplicável	N/A
$DTQ \geq DSC$	Vp não para antes do SC	Não evitável	$TQvp > Tvs$	Vp chega ao SC após Vs	Evitável
$DTQ \geq DSC$	Vp não para antes do SC	Não evitável	$TQvp = Tvs$	Vp chega ao SC junto com Vs	Não evitável

Onde:

DTQ: Distância Total Questionada (através da velocidade máxima permitida);

DSC: Distância até o Sítio de Colisão;

SC: Sítio de Colisão;

Vp: Veículo Principal;

Vs: Veículo Secundário;

TQvp: Tempo Questionado do Veículo Principal até o Sítio de Colisão;

Tvs: Tempo do Veículo Secundário até o Sítio de Colisão;

N/A: Não aplicável, pois já existe solução física válida para o problema nas condições consideradas.

A análise espacial permanece adequada para situações em que o foco recai sobre a capacidade de parada do veículo, enquanto a análise temporal se mostra particularmente indicada em cenários envolvendo trajetórias convergentes, nos quais a ocorrência da colisão depende da coincidência espaço-temporal entre os envolvidos.

Assim, a aplicação do método temporal deve ser orientada por critérios objetivos previamente definidos, evitando interpretações subjetivas e assegurando consistência técnico-científica na elaboração do laudo pericial.

3.3. Fluxo para aplicação do método temporal

Para fins de reprodutibilidade, a aplicação pericial do método temporal pode ser organizada na seguinte sequência: (i) determinar as velocidades dos veículos envolvidos; (ii) determinar as distâncias até a região de colisão; (iii) calcular o tempo de chegada de cada veículo ao sítio de colisão; (iv) recalcular os tempos considerando o limite regulamentar da via; (v) avaliar se existe coincidência espaço-temporal entre as trajetórias; (vi) incorporar as incertezas associadas às variáveis utilizadas; e (vii) estimar a probabilidade de coincidência temporal por meio de análise probabilística (Figura 1).

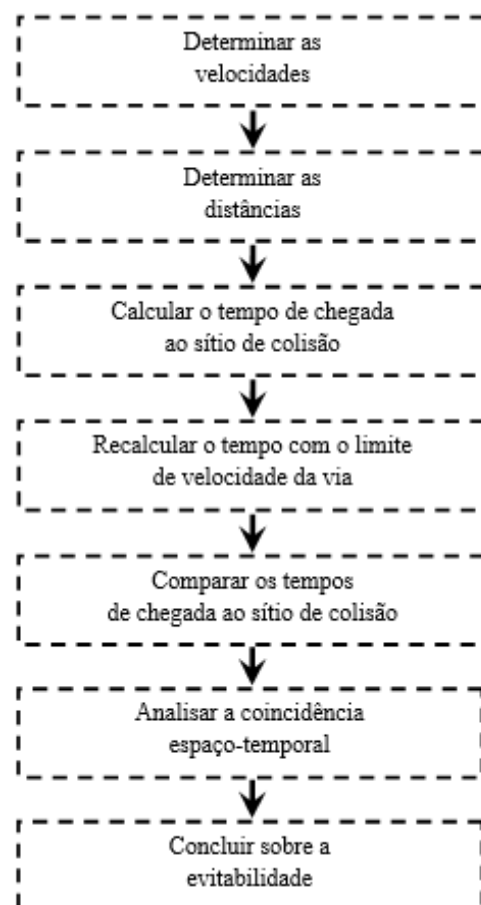


Figura 1: Fluxograma conceitual do método temporal proposto para análise da evitabilidade.

4. APLICAÇÃO PRÁTICA

Para o entendimento prático de aplicação do método proposto, foram utilizados quatro casos de ocorrências de trânsito atendidas pela perícia criminal do Estado do Acre, sendo que no primeiro, segundo e terceiro casos, foi comparado o método proposto com a análise de evitabilidade espacial, na qual se analisou a distância de parada do veículo principal; no quarto caso foi realizada a análise de possibilidade de não ocorrência do acidente sem qualquer (re)ação por parte dos condutores, com base apenas nas velocidades e no tempo de deslocamento.

Para a análise dos casos, foram adotados valores de referência para o fator de arrasto (*drag factor*) compatíveis com a natureza dos veículos envolvidos, considerando a necessidade de representação probabilística das variáveis de entrada.

No caso de veículos automotores de quatro rodas, a literatura especializada em reconstrução de acidentes de trânsito indica que, em pavimento asfáltico seco e em boas condições, os valores típicos do fator de arrasto situam-se no intervalo entre 0,6 e 0,9 [10], [11], [12]. Com base nesse intervalo e visando incorporar a variabilidade inerente às condições reais de circulação (tais como estado do pavimento, características dos pneus, eficiência do sistema de frenagem e condições operacionais) adotou-se, nos cenários estudados, o valor médio de 0,75, associado a um desvio padrão de 0,05.

Ressalta-se que tal parametrização não corresponde a um valor único tabelado com definição estatística formal na literatura, mas sim a uma modelagem probabilística coerente com a dispersão observada em dados experimentais. Estudos técnicos, especialmente aqueles publicados pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), demonstram a variabilidade dos níveis de desaceleração veicular em função das condições de frenagem, reforçando a adequação da abordagem adotada [13], [14], [15].

Para motocicletas, adotou-se valores experimentais específicos disponíveis na literatura técnica, os quais apresentam definição estatística explícita. Em condições de frenagem com utilização predominante do freio traseiro em superfície asfáltica seca, o fator de arrasto apresenta valor médio de 0,425, com desvio padrão de 0,029, sendo adequadamente representado por uma distribuição normal.

Esses valores são consistentes com estudos experimentais sobre desempenho de frenagem de motocicletas, que evidenciam significativa variabilidade da desaceleração em função do sistema de frenagem, da distribuição de carga e das condições de aderência [16], [17].

Dessa forma, nos cenários envolvendo motocicletas, o fator de arrasto foi modelado como variável aleatória com distribuição normal, com média igual a 0,425 e desvio

padrão de 0,029. Tanto nos casos envolvendo automóveis quanto nos casos envolvendo motocicletas, tais variáveis foram utilizadas nas simulações por meio do método de Monte Carlo [18].

4.1. Análise das incertezas e simulação probabilística

Para avaliar o impacto das incertezas associadas às variáveis utilizadas nos cálculos, foi realizada uma análise probabilística baseada no método de Monte Carlo [18]. Esse método consiste na geração de múltiplas combinações aleatórias das variáveis de entrada dentro de seus respectivos intervalos de incerteza, permitindo estimar a distribuição de probabilidade dos resultados obtidos.

As simulações foram implementadas utilizando o Microsoft Excel [19], com geração de valores aleatórios dentro das distribuições assumidas para cada variável de entrada, tais como velocidade, distâncias, tempo de percepção e reação e fator de arrasto. A partir dessas simulações, foi possível estimar a distribuição estatística dos tempos de chegada dos veículos ao sítio de colisão.

Foram excluídas das simulações as soluções fisicamente impossíveis (distâncias e tempos negativos e radicais de números negativos), restringindo os resultados a cenários fisicamente admissíveis.

Os resultados obtidos por simulação de Monte Carlo são representados por distribuições resultantes da simulação numérica, sendo ajustados por distribuições gaussianas caracterizadas por suas respectivas médias e desvios-padrão. A probabilidade de ocorrência simultânea dos eventos foi, então, estimada por meio da área de sobreposição entre as funções densidade de probabilidade associadas aos tempos de chegada dos veículos.

Ressalta-se que a aproximação gaussiana constitui uma simplificação analítica dos resultados empíricos, sendo adequada quando as distribuições apresentam comportamento aproximadamente simétrico e compatível com a prática empregada em softwares de reconstrução de acidentes como o eCRASH [20].

A abordagem espaço-temporal adotada neste estudo é compatível com a lógica utilizada em softwares de reconstrução de acidentes amplamente empregados na prática pericial internacional, tais como PC-Crash, Virtual CRASH e HVE (Human Vehicle Environment). Esses programas realizam simulações numéricas da dinâmica veicular a partir das condições iniciais de movimento, permitindo determinar a posição dos veículos em função do tempo durante toda a evolução do evento. O método proposto neste trabalho aplica a mesma lógica de análise espaço-temporal, por meio de equações da cinemática clássica, o que possibilita sua utilização mesmo na ausência de softwares especializados.

4.2. Primeiro caso: colisão motocicleta x automóvel

Em um entroncamento em nível, uma motocicleta (veículo principal) e um automóvel (veículo secundário) circulavam na mesma via em sentidos opostos. Foi verificado que o veículo secundário realizou uma manobra de conversão à esquerda em velocidade constante de (22 ± 1) km/h. O condutor do veículo principal avistou a manobra por parte do veículo secundário e acionou somente o freio traseiro e produziu marcas de pneumático no pavimento asfáltico na ordem de (6,10 a 6,14) m e em seguida colidiu com seu setor anterior contra o setor lateral direito do automóvel.

Os dados de levantamento de local possibilitaram a elaboração de desenho técnico conforme **Figura 2**:

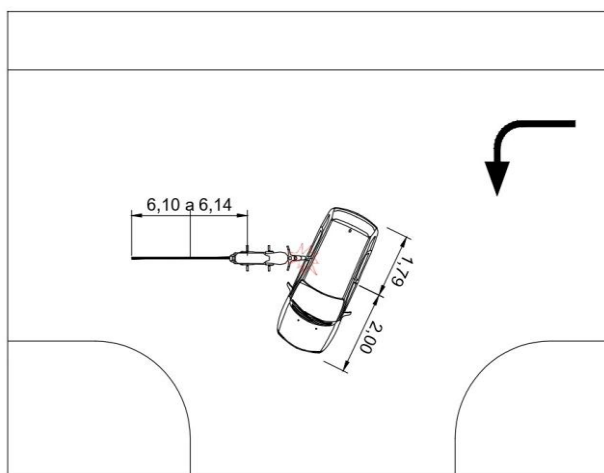


Figura 2: Colisão entre o veículo principal e o secundário.

Todos os cálculos iniciais para a velocidade e análise da evitabilidade pelo método espacial foram elaborados utilizando a plataforma eCRASH [20] com o módulo de “evitabilidade de uma colisão em um evento precedido por desaceleração”.

A velocidade máxima permitida para a via era de 30 km/h e a velocidade calculada do veículo principal foi de $(37,7 \pm 0,8)$ km/h, acima do limite de velocidade máxima permitido. De acordo com as condições do local e a idade do condutor, foi-lhe atribuído um tempo de percepção e reação de $(0,80 \pm 0,50)$ s [21]. O fator de arrasto entre o pneumático da motocicleta e o pavimento asfáltico era de $0,425 \pm 0,029$.

Em seguida foi analisada a evitabilidade da ocorrência caso o veículo principal transitasse dentro do limite de velocidade máxima permitido para o local, 30 km/h. A conclusão das análises foi da não evitabilidade da colisão.

Aplicando a metodologia temporal proposta, procedeu-se à análise sob a perspectiva dinâmica da variável tempo. Para melhor entendimento as informações do veículo principal e do veículo secundário foram resumidas conforme **Tabela 2**:

Tabela 2: Informações do veículo principal na velocidade de circulação:

Grandeza	Valor
Velocidade de circulação	$(37,7 \pm 0,8)$ km/h ou $(10,46 \pm 0,22)$ m/s
Tempo de percepção e reação	$(0,80 \pm 0,50)$ s [21]
Distância de percepção e reação	$(8,39 \pm 5,22)$ m
Distância de frenagem	$(6,10 \text{ a } 6,14)$ m
Distância total desde a percepção até colisão	$(14,79 \pm 4,35)$ m
Fator de arrasto	$0,425 \pm 0,029$
Aceleração da gravidade	$9,81 \text{ m/s}^2$

De posse dessas informações foi calculado o tempo disponível desde a percepção de perigo pelo condutor do veículo principal até a colisão para a velocidade real de circulação. Inicialmente calculou-se a velocidade de colisão mediante o processo de desaceleração do veículo principal através da Eq. 3, onde a desaceleração é o produto do fator de arrasto pela aceleração da gravidade. Obtendo uma velocidade de colisão de $(7,63 \pm 0,38)$ m/s.

Aplicando o resultado na Eq. 1 obteve-se que o tempo gasto no processo de frenagem foi de $(0,68 \pm 0,11)$ s, que somado ao tempo de percepção e reação resultou em um tempo total disponível de $(1,48 \pm 0,51)$ s.

Em seguida calculou-se o tempo de circulação do veículo principal desde a percepção do perigo até a região de colisão caso transitasse com a velocidade máxima da via, 30 km/h. A **Tabela 3** mostra os valores utilizados:

Tabela 3: Informações do veículo principal na velocidade máxima da via:

Grandeza	Valor
Velocidade inicial	30 km/h ou $8,33 \text{ m/s}$
Tempo de percepção e reação	$(0,80 \pm 0,50)$ s [21]
Distância até o acionamento do freio (percepção e reação)	$(7,17 \pm 3,73)$ m
Distância total desde a percepção até colisão	$(14,79 \pm 4,35)$ m
Distância disponível para frenagem até a região de colisão (ΔS) (distância total – distância de percepção e reação)	$(7,58 \pm 5,01)$ m
Fator de arrasto	$0,425 \pm 0,029$
Aceleração da gravidade	$9,81 \text{ m/s}^2$

De posse dessas informações foi calculado o tempo de circulação desde a percepção de perigo pelo condutor do veículo principal até a colisão. Inicialmente calculou-se a velocidade de colisão mediante o processo de desaceleração do veículo principal através da Eq. 3, onde a desaceleração é o produto do fator de arrasto pela

aceleração da gravidade. Chegando a uma velocidade de colisão de $(5,03 \pm 1,92)$ m/s.

Aplicando o resultado na Eq. 1 tem-se que o tempo gasto no processo de frenagem foi de $(0,79 \pm 0,41)$ s, que acrescido ao tempo de percepção e reação totalizou um tempo de circulação nesse trecho de $(1,61 \pm 0,61)$ s.

Em seguida foi calculado o tempo necessário para o veículo secundário passar completamente da região de colisão. Com o tempo disponível de $(1,61 \pm 0,61)$ s e a velocidade uniforme de (22 ± 1) km/h ou $(6,11 \pm 0,28)$ m/s aplicado na Eq. 4, obteve-se que ele estava situado a uma distância d $(9,01 \pm 2,81)$ m da região de colisão quando o veículo principal avistou sua manobra.

Para que o veículo secundário passasse completamente da região era necessário que todo o seu comprimento passasse do local, pois a colisão se deu no seu setor lateral direito, a 1,79 m da região posterior. O que totalizou uma distância d' de $(10,80 \pm 2,47)$ m a ser percorrida em velocidade constante.

A análise da compatibilidade espaço-temporal não se restringe a um ponto no espaço, devendo considerar todo o comprimento do veículo secundário, desde a região de impacto em seu setor lateral direito até a sua porção posterior. Dessa forma, a distância relevante deve ser tratada como uma faixa espacial, uma vez que a colisão pode ocorrer em qualquer ponto ao longo dessa extensão, conforme Figura 3.

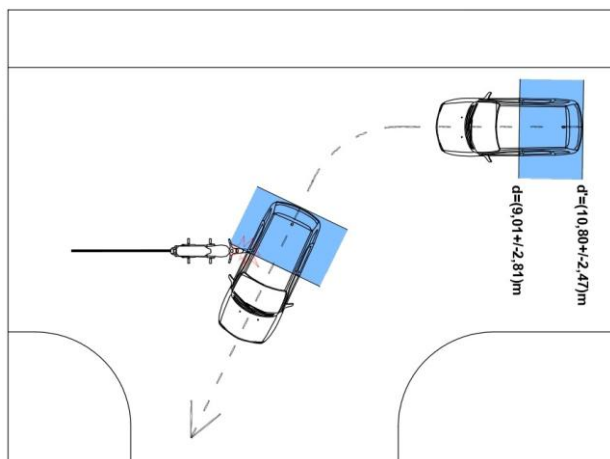


Figura 3: Faixa do veículo secundário ($d-d'$) e suas distâncias ao sítio de colisão.

A distribuição dessa faixa do veículo secundário será uniforme entre o limite inferior de d e o limite superior de d' .

Aplicando os valores na Eq. 4, obteve-se que o veículo secundário percorreria essa distância em um tempo de $(1,57 \pm 0,59)$ s, ou seja, tempo similar aos $(1,61 \pm 0,61)$ s em que veículo principal chegaria na mesma região caso transitasse com a velocidade máxima da via.

Analisando as incertezas aplicadas aos cálculos foi gerada a distribuição dos tempos por simulação de Monte

Carlo, a qual, para fins de visualização e comparação, foi aproximada por uma curva gaussiana a partir da média e do desvio padrão obtidos para o tempo de chegada de cada veículo ao sítio de colisão, conforme demonstrado nas Figura 4 e Figura 5:

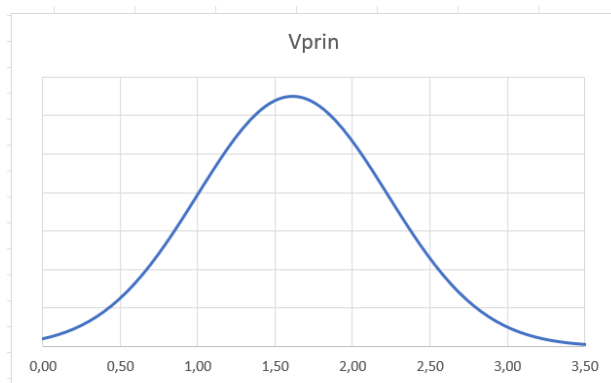


Figura 4: Distribuição de probabilidade do veículo principal (Média: 1,61s; Desvio padrão: 0,61s).

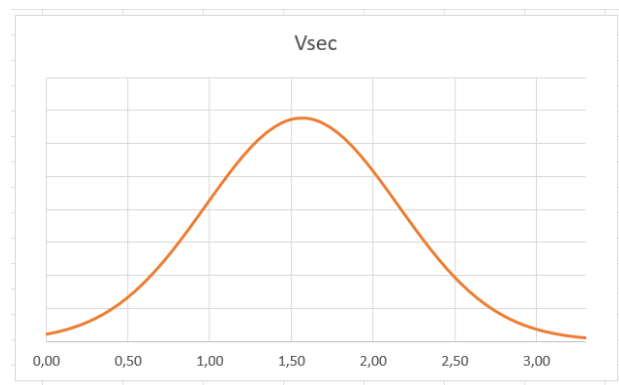


Figura 5: Distribuição de probabilidade do veículo secundário (Média: 1,57s; Desvio padrão: 0,59s).

Para analisar a probabilidade de ambos os veículos ocuparem o sítio de colisão no mesmo momento, calculou-se a área comum entre as distribuições de probabilidade dos tempos de chegada, conforme demonstrado na Figura 6.

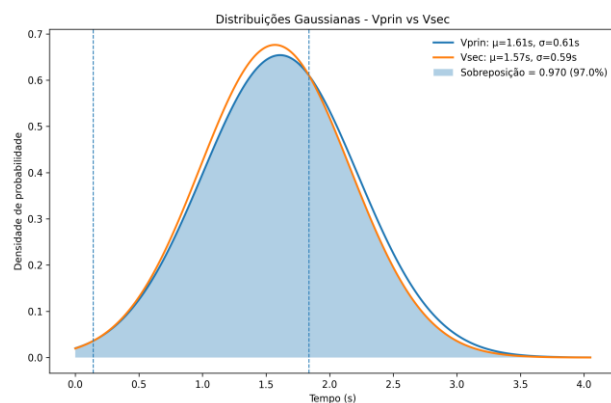


Figura 6: Sobreposição dos gráficos gaussianos dos veículos principal e

secundário.

A probabilidade de coincidência temporal entre os eventos pode ser estimada pela área de sobreposição entre as duas distribuições de probabilidade, calculada pela integral do menor valor entre as duas funções densidade de probabilidade em cada ponto do domínio:

$$P_{\text{overlap}} = \int_{-\infty}^{\infty} \min(f_1(t), f_2(t)) dt \quad (5)$$

Onde $f_1(t)$ e $f_2(t)$ representam as funções densidade de probabilidade associadas aos tempos de chegada de cada veículo ao sítio de colisão.

A sobreposição entre as distribuições resultou em probabilidade de coincidência temporal de 97,00% caso o veículo principal respeitasse o limite de velocidade máxima da via, indicando elevada compatibilidade entre os tempos de chegada dos veículos à região de conflito.

Todavia, a análise geométrica da posição relativa dos corpos demonstra que a eventual colisão ocorreria em outra região do veículo secundário, e não necessariamente no setor observado no evento original. A área de sobreposição, portanto, deve ser interpretada como medida de compatibilidade temporal, e não como confirmação automática da reprodução da mesma colisão. Tal distinção é fundamental para a correta aplicação do método em contexto pericial.

4.3. Segundo caso: atropelamento automóvel x pedestre

Em um trecho de via, um automóvel (veículo principal) transitava em velocidade superior ao limite de velocidade máxima permitida e atropelou um pedestre que atravessava a via da esquerda para a direita no sentido de circulação do veículo principal.

Todos os cálculos iniciais para a velocidade e análise da evitabilidade pelo método espacial foram elaborados utilizando a plataforma eCRASH [20] com o módulo “evitabilidade de uma colisão com desaceleração não determinada”.

A velocidade máxima permitida para a via era de 40 km/h e a velocidade calculada do veículo principal foi de (53 ± 1) km/h, acima do limite de velocidade máxima permitido. De acordo com as referências bibliográficas para o caso, foi-lhe atribuído um tempo de percepção e reação de $(1,70 \pm 0,60)$ s [21]. O fator de arrasto entre o pneumático do automóvel e o pavimento asfáltico era de $0,75 \pm 0,05$.

Em seguida foi analisada a evitabilidade da ocorrência caso o veículo principal transitasse dentro do limite de velocidade máxima permitido para o local, 40 km/h. A conclusão das análises foi da não evitabilidade do atropelamento.

Aplicando a metodologia temporal proposta, procedeu-se à análise sob a perspectiva dinâmica da

variável tempo. Para melhor entendimento as informações do veículo principal e do pedestre foram resumidas em forma de tabela, conforme Tabela 4:

Tabela 4: Informações do veículo principal na velocidade de circulação e do pedestre:

Grandeza	Valor
Velocidade de circulação	(53 ± 1) km/h ou $(14,72 \pm 0,28)$ m/s
Velocidade máxima permitida	40 km/h ou 11,11 m/s
Largura do veículo de acordo com o fabricante	1,664 m
Tempo de percepção e reação (tpr)	$(1,70 \pm 0,60)$ s [21]
Distância de circulação do pedestre até o sítio de atropelamento (levantamento de local)	2 a 3 m
Velocidade de circulação do pedestre	1,5 m/s [21]
Tempo de circulação do pedestre até o sítio de atropelamento	$(1,67 \pm 0,19)$ s
Distância total do veículo principal desde a percepção até o atropelamento	$(24,56 \pm 2,88)$ m
Fator de arrasto (μ)	$0,75 \pm 0,05$
Aceleração da gravidade (g)	$9,81 \text{ m/s}^2$

Inicialmente calculou-se o tempo de circulação do veículo principal desde a percepção do perigo até a região de atropelamento caso transitasse com a velocidade máxima da via, 40 km/h. Para isso, calculou-se a distância percorrida no tempo de percepção e reação do condutor, obtendo uma distância de $(18,92 \pm 6,59)$ m. Valor este que subtraído da distância total, tem-se uma distância de $(7,79 \pm 4,78)$ m disponível para desaceleração do veículo principal.

Ao acionar os freios, a velocidade de atropelamento será diferente e calculada mediante o conhecimento da distância disponível para frenagem. Utilizando a Eq. 3, teve-se que a velocidade de atropelamento seria de $(6,54 \pm 2,55)$ m/s ou $(23,54 \pm 9,18)$ km/h.

Aplicando o resultado na Eq. 1 obteve-se que o tempo gasto no processo de frenagem foi de $(0,62 \pm 0,31)$ s, que somado ao tempo de percepção e reação totalizou um tempo de circulação nesse trecho de $(2,31 \pm 0,66)$ s.

Em seguida foi calculado o tempo necessário para que o pedestre passasse completamente da região de atropelamento, devendo, para isso, vencer a distância de 2 a 3 m até o sítio de atropelamento acrescida da largura do veículo. Com a velocidade uniforme de 1,5 m/s aplicado na Eq. 4, tem-se que ele percorreria essa distância em um

tempo de $(2,22 \pm 0,51)$ s, ou seja, similar aos $(2,31 \pm 0,66)$ s em que veículo principal chegaria na mesma região caso transitasse com a velocidade máxima da via.

Analisando as incertezas aplicadas aos cálculos foi gerada a distribuição dos tempos por simulação de Monte Carlo, a qual, para fins de visualização e comparação, foi aproximada por uma curva gaussiana a partir da média e do desvio padrão obtidos para o tempo de chegada de cada veículo ao sítio de colisão, conforme demonstrado nas **Figura 7** e **Figura 8**:

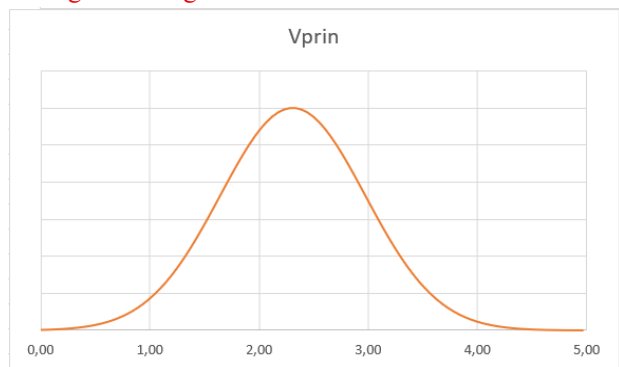


Figura 7: Distribuição de probabilidade do veículo principal (Média: 2,31s; Desvio padrão: 0,66s).

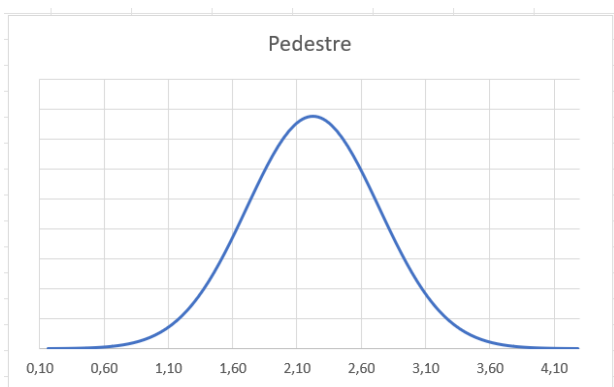


Figura 8: Distribuição de probabilidade do tempo do pedestre (Média: 2,22s; Desvio padrão: 0,51s).

Para analisar a probabilidade do veículo principal e do pedestre ocuparem o sítio de atropelamento simultaneamente, calculou-se a área comum entre as distribuições de probabilidade dos tempos de chegada, conforme demonstrado na **Figura 9**.

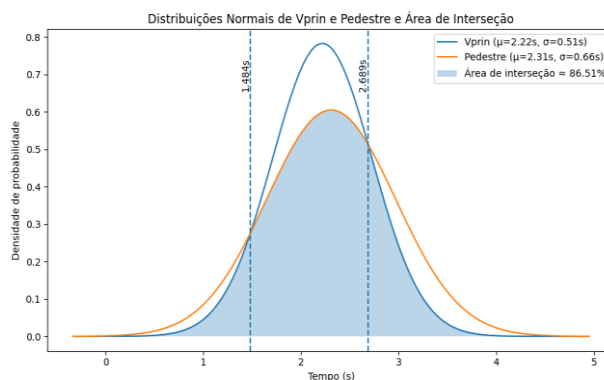


Figura 9: Sobreposição dos gráficos gaussianos dos tempos do veículo principal e do pedestre.

A probabilidade de coincidência temporal entre os eventos foi estimada utilizando a Eq. (5), resultando em probabilidade de coincidência temporal de aproximadamente 86,51% caso o veículo principal respeitasse o limite de velocidade máxima da via. Esse resultado indica que, considerando as incertezas adotadas, ainda existe compatibilidade estatística entre os tempos de ocupação do sítio de colisão do veículo principal e do pedestre. Todavia, a análise geométrica da posição relativa dos corpos demonstra que o eventual atropelamento ocorreria em outra região do veículo principal, e em velocidade inferior à velocidade de atropelamento calculada. A área de sobreposição, portanto, deve ser interpretada como medida de compatibilidade temporal, e não como confirmação automática da reprodução do mesmo evento.

Ainda que a possibilidade de coincidência temporal seja de aproximadamente 86,51%, a metodologia proposta difere do método tradicional porque não se limita à distância de parada. A análise espaço-temporal permite verificar se a interação entre o veículo e o pedestre, considerando sua geometria e posição relativa ao longo do tempo, reproduziria ou não a mesma configuração de evento.

4.4. Terceiro caso: colisão automóvel x carreta

Em um trecho rural de uma rodovia, uma carreta (veículo secundário) cruzou a pista de rolamento saindo do pátio de uma distribuidora para acessar o lado oposto da rodovia. A perícia de local identificou que ele realizou essa manobra de forma contínua a partir do pátio do depósito que possuía uma via de acesso.

A colisão ocorreu no setor lateral esquerdo do veículo secundário e se deu contra o setor anterior de um automóvel (veículo principal) que transitava na rodovia e seu condutor não realizou nenhuma ação para evitar a colisão, seja acionando os freios ou realizando uma manobra evasiva. A velocidade do veículo principal foi calculada em (120 ± 3) km/h, sendo que a velocidade

máxima permitida para o trecho da rodovia era de 80 km/h. O desenho técnico representado na **Figura 10** ilustra o local:

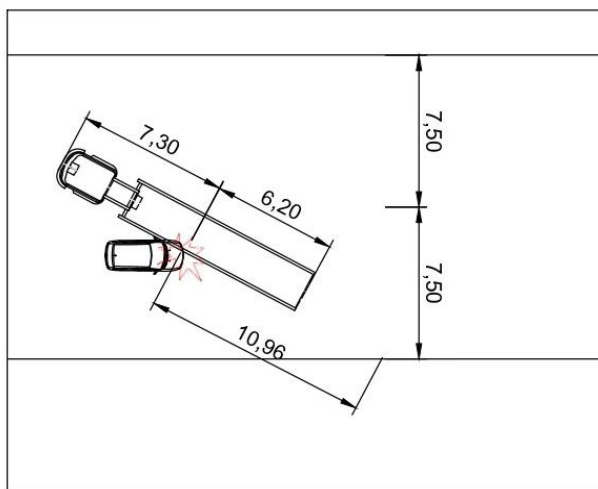


Figura 10: Colisão entre veículo principal e veículo secundário.

Todos os cálculos para a análise da evitabilidade pelo método espacial foram elaborados utilizando a plataforma eCRASH [20] com o módulo “evitabilidade de uma colisão com desaceleração não determinada”, com um tempo disponível para a análise da evitabilidade de $(1,88 \pm 0,06)$ s.

De acordo com as referências bibliográficas para o caso, foi-lhe atribuído um tempo de percepção e reação de $(1,10 \pm 0,58)$ s [21]. O fator de arrasto entre o pneumático do automóvel e o pavimento asfáltico era de $0,75 \pm 0,05$.

Em seguida foi analisada a evitabilidade da ocorrência caso o veículo principal transitasse dentro do limite de velocidade máxima permitido para o local, 80 km/h pelo método espacial. A conclusão das análises foi da não evitabilidade da colisão.

Aplicando a metodologia temporal proposta, procedeu-se à análise sob a perspectiva dinâmica da variável tempo. Para melhor entendimento as informações do veículo principal e do veículo secundário foram resumidas em forma de tabela, conforme **Tabela 5**:

Tabela 5: Dados para cálculo:

Grandeza	Valor
Velocidade de circulação do veículo principal	(120 ± 3) km/h ou $(33,33 \pm 0,83)$ m/s
Posição inicial do veículo secundário	0 m
Distância do veículo secundário à região de colisão de acordo com levantamento de local (d)	$[(10,96 \pm 0,15) + 7,30] = (18,26 \pm 0,15)$ m
Velocidade máxima da via	80 km/h ou 22,22 m/s
Velocidade do veículo secundário	(35 ± 1) km/h ou $(9,72 \pm 0,28)$ m/s

Comprimento do veículo secundário, dividido da seguinte forma: região anterior-colisão + colisão-região posterior (ver Figura 10)	$7,30 + 6,20 = 13,50$ m
---	-------------------------

De posse dessas informações foi calculado o tempo disponível desde o início da realização da manobra do veículo secundário até a região de colisão, que estava distante 7,30 m da sua região anterior (**Figura 10**). Utilizando a Eq. 4 teve-se que o tempo gasto nesse percurso foi de $(1,88 \pm 0,06)$ s.

Utilizando a Eq. 4 para a velocidade de circulação o veículo principal, obteve-se que ele estava situado à $(62,65 \pm 1,88)$ m de distância da região de colisão quando o veículo secundário iniciou sua manobra.

Agora, utilizando a Eq. 4 para calcular o tempo em que o veículo principal percorreria a distância de $(62,65 \pm 1,88)$ m caso transitasse com a velocidade máxima da via, sem nenhuma reação por parte do condutor, resultou que o tempo gasto nesse percurso seria de $(2,82 \pm 0,08)$ s.

Em seguida foi calculado o tempo necessário para o veículo secundário passar completamente da região de colisão. Para que o veículo secundário passasse completamente da região era necessário que todo o seu comprimento passasse do local, pois a colisão se deu no seu setor lateral esquerdo, a 6,20 m da região posterior. De acordo com as informações do fabricante, seu comprimento é de 13,50 m, totalizando uma distância d' de $(24,46 \pm 0,15)$ m a ser percorrida em velocidade constante.

Considerando a extensão geométrica do veículo, a região de colisão foi tratada como uma faixa espacial, conforme descrito anteriormente, que compreende desde a região de impacto em seu setor lateral esquerdo até a sua porção posterior. Dessa forma, a distância relevante deve ser tratada como uma faixa espacial, uma vez que a colisão pode ocorrer em qualquer ponto ao longo dessa extensão, conforme **Figura 11**.

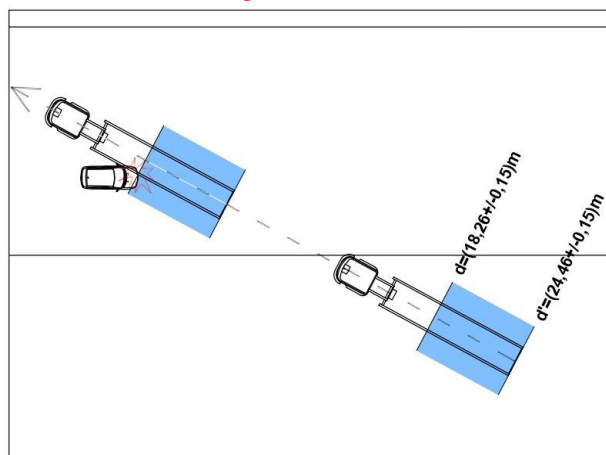


Figura 11: Faixa do veículo secundário (d-d') e suas distâncias ao sítio de colisão.

Utilizando a Eq. 4, o veículo secundário percorreria essa distância em um tempo de $(2,20 \pm 0,21)$ s. Este tempo deve ser comparado aos $(2,82 \pm 0,08)$ s em que veículo principal chegaria na mesma região transitando com a velocidade máxima da via.

Analizando as incertezas aplicadas aos cálculos foi gerada a distribuição dos tempos por simulação de Monte Carlo, a qual, para fins de visualização e comparação, foi aproximada por uma curva gaussiana a partir da média e do desvio padrão obtidos para o tempo de chegada de cada veículo ao sítio de colisão, conforme demonstrado nas **Figura 12** e **Figura 13**:

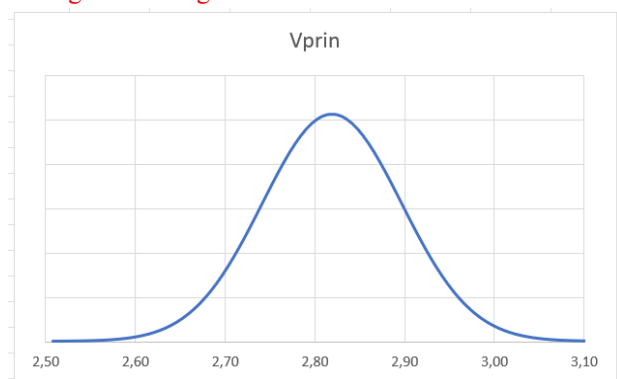


Figura 12: Distribuição de probabilidade do veículo principal (Média: 2,82s; Desvio padrão:0,08s).

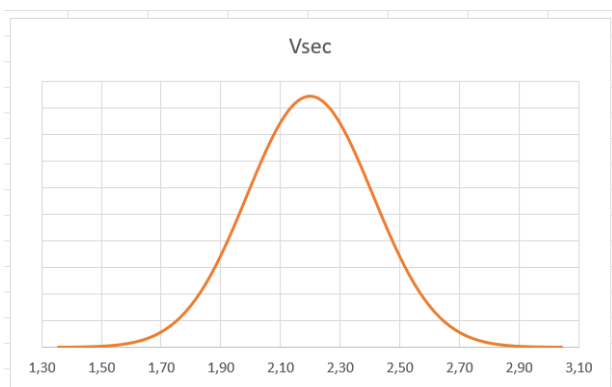


Figura 13: Distribuição de probabilidade do veículo secundário (Média: 2,20s; Desvio padrão:0,21s).

Para analisar a probabilidade de ambos os veículos ocuparem o sítio de colisão no mesmo momento, calculou-se a área comum entre as distribuições de probabilidade dos tempos de chegada, conforme demonstrado na **Figura 14**.

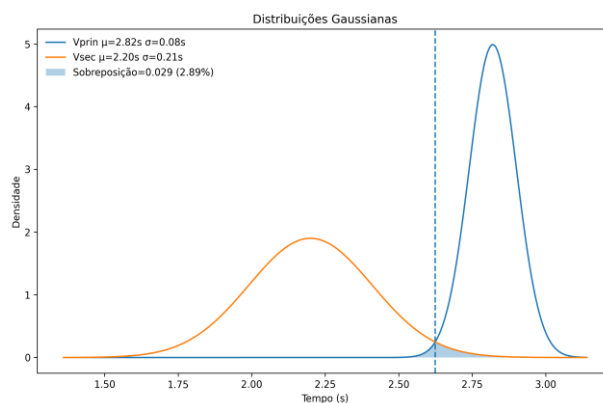


Figura 14: Sobreposição dos gráficos gaussianos dos veículos principal e secundário.

A probabilidade de coincidência temporal entre os eventos foi estimada utilizando a Eq. (5), resultando em probabilidade de coincidência temporal de aproximadamente 2,89% caso o veículo principal respeitasse o limite de velocidade máxima da via e não tivesse nenhuma reação de frenagem do veículo, conforme observado no levantamento de local. Trata-se de probabilidade baixa de ocupação simultânea da mesma região no mesmo instante, reforçando a conclusão de que o veículo secundário passaria pela região de colisão antes da chegada do veículo principal nas condições analisadas. Resultado distinto daquele obtido pela metodologia espacial.

4.5. Quarto caso: colisão motocicleta x automóvel

Em um entroncamento oblíquo, um automóvel (veículo secundário) cruzou a pista de rolamento de uma via para acessar lote lindeiro no lado oposto. No levantamento de local identificou-se que ele parou no limite do entroncamento e em seguida acelerou em direção ao lote. A via que o veículo pretendia cruzar tinha a largura de 8,80 m divididos igualmente em duas faixas de trânsito e a região de colisão se deu na primeira faixa à 50 cm do eixo da via.

A colisão ocorreu no setor angular anterior direito do veículo secundário e se deu contra o setor anterior de uma motocicleta (veículo principal) que transitava na outra via e seu condutor não realizou nenhuma ação para evitar a colisão, seja acionando os freios ou realizando uma manobra evasiva. A velocidade do veículo principal foi calculada em (55 ± 9) km/h, sendo que a velocidade máxima permitida para o trecho da via era de 30 km/h. O desenho técnico na **Figura 15** ilustra o local:

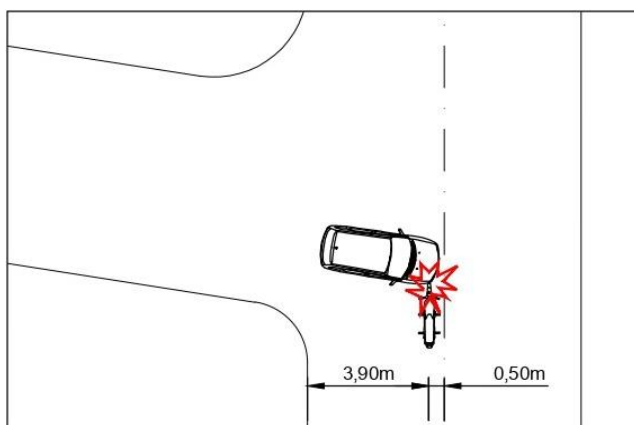


Figura 15: Colisão entre veículo principal e veículo secundário.

O veículo principal estava em um movimento retilíneo uniforme (MRU) e o veículo secundário em um movimento retilíneo uniformemente variado (MRUV) em processo de aceleração.

Aplicando a metodologia temporal proposta, procedeu-se à análise sob a perspectiva dinâmica da variável tempo.

Para maior entendimento os dados utilizados estão resumidos na **Tabela 6**:

Tabela 6: Dados para cálculo:

Grandeza	Valor
Velocidade de circulação do veículo principal	(55 ± 9) km/h ou $(15,28 \pm 2,5)$ m/s
Posição inicial do veículo secundário	0 m
Distância do veículo secundário à região de colisão de acordo com a geometria do entroncamento oblíquo	$(3,95 \pm 0,05)$ m
Velocidade máxima da via	30 km/h ou 8,33 m/s
Velocidade inicial do veículo secundário	0 m/s
Aceleração do veículo secundário informada pelo fabricante	$1,86 \text{ m/s}^2$
Comprimento do veículo secundário informado pelo fabricante	3,90 m

De posse dessas informações foi calculado o tempo disponível desde o início da realização da manobra do veículo secundário, partindo do repouso, até a região de colisão. Utilizando a Eq. 2 teve-se que o tempo gasto nesse percurso foi de $(2,06 \pm 0,01)$ s.

Utilizando a Eq. 4 para a velocidade de circulação o veículo principal, obteve-se que ele estava situado à $(31,49 \pm 2,76)$ m de distância da região de colisão quando o veículo secundário iniciou sua manobra.

Agora, utilizando a Eq. 4 para calcular o tempo em que o veículo principal percorreria a distância de $(31,49 \pm 2,76)$ m caso transitasse com a velocidade máxima da via, sem nenhuma reação por parte do condutor, obteve-se que o tempo gasto nesse percurso seria de $(3,78 \pm 0,30)$ s.

Em seguida foi calculado o tempo necessário para que o veículo secundário passasse o seu setor angular anterior direito completamente da região de colisão, sabendo que este setor estava situado a 3,95 m (ver **Tabela 6**). Para que o veículo secundário passasse completamente da região é necessário que todo o seu comprimento passasse do local, pois a colisão se deu no seu setor angular anterior direito. De acordo com as informações do fabricante, seu comprimento era de 3,90 m, totalizando uma distância de $(7,85 \pm 0,05)$ m a ser percorrida a partir do repouso.

Utilizando a Eq. 2, constatou-se que o veículo secundário percorreria essa distância em um tempo de $(2,91 \pm 0,01)$ s, ou seja, tempo inferior aos $(3,78 \pm 0,30)$ s em que veículo principal chegaria na mesma região transitando com a velocidade máxima da via. De forma objetiva, verifica-se que o veículo secundário passaria pela região de colisão antes da chegada do veículo principal caso este transitasse com a velocidade máxima da via.

Analisando as incertezas aplicadas aos cálculos foi gerada a distribuição dos tempos por simulação de Monte Carlo, a qual, para fins de visualização e comparação, foi aproximada por uma curva gaussiana a partir da média e do desvio padrão obtidos para o tempo de chegada de cada veículo ao sítio de colisão, conforme demonstrado nas **Figura 16** e **Figura 17**:

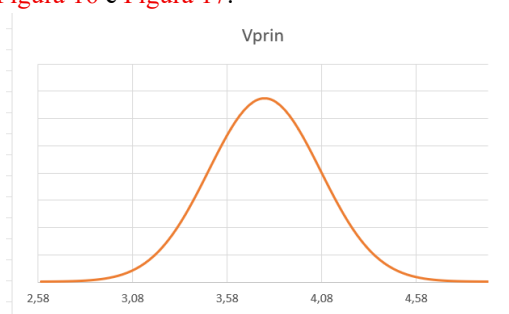


Figura 16: Distribuição de probabilidade do veículo principal (Média: 3,78s; Desvio padrão: 0,30s).

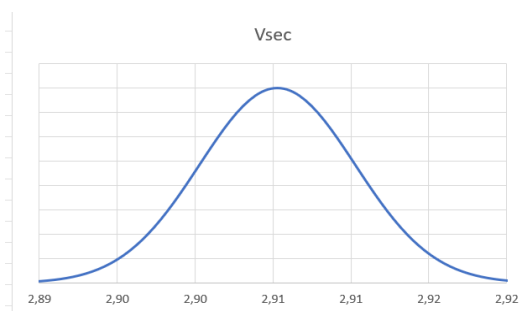


Figura 17: Distribuição de probabilidade do veículo secundário (Média: 2,91s; Desvio padrão:0,01s).

Para analisar a probabilidade de ambos os veículos ocuparem o sítio de colisão no mesmo momento, calculou-se a área comum entre as distribuições de probabilidade dos tempos de chegada, conforme demonstrado na **Figura 18**.

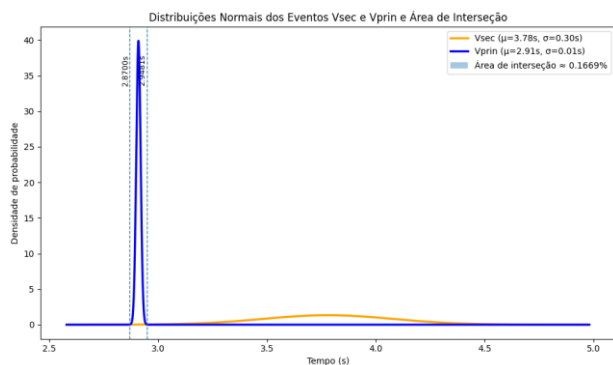


Figura 18: Sobreposição dos gráficos gaussianos dos veículos principal e secundário.

A probabilidade de coincidência temporal entre os eventos foi estimada utilizando a Eq. (5), resultando em probabilidade de coincidência temporal de aproximadamente 0,17% caso o veículo principal respeitasse o limite de velocidade máxima da via. Trata-se de probabilidade extremamente baixa de ocupação simultânea da mesma região no mesmo instante, reforçando a conclusão de que o veículo secundário passaria pela região de colisão antes da chegada do veículo principal nas condições analisadas. Os desenhos técnicos a seguir elaborados com os valores absolutos demonstram o evento, conforme **Figura 19**, **Figura 20** e **Figura 21**.

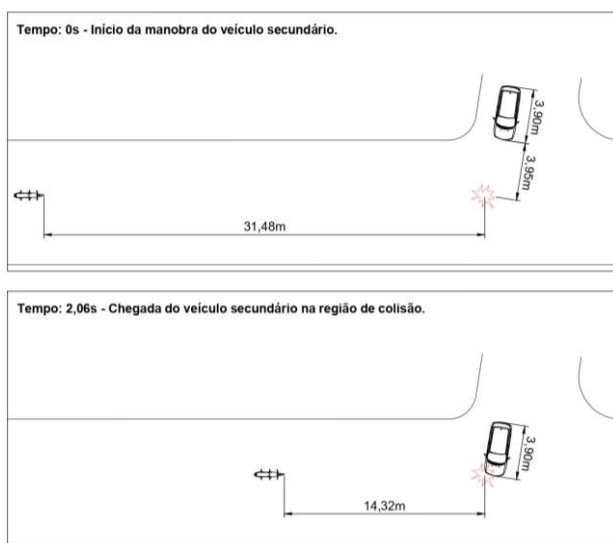


Figura 19: Posição dos veículos nos tempos 0s e 2,06s.

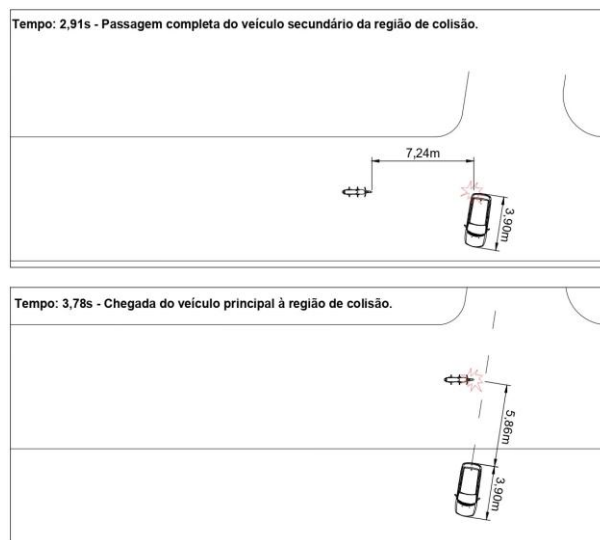


Figura 20: Posição dos veículos nos tempos 2,91s e 3,78s.

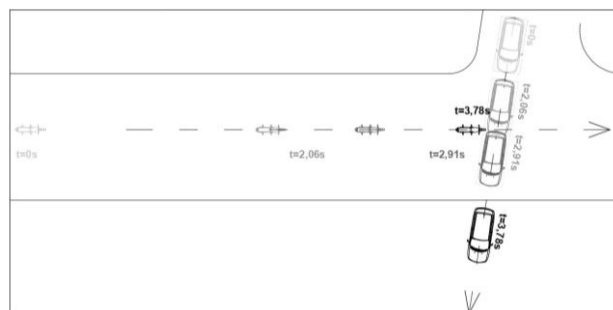


Figura 21: Sobreposição das posições no espaço e tempo dos veículos na ocorrência.

5. DISCUSSÃO

Os casos apresentados constituem aplicações práticas da metodologia proposta, cujo fundamento se baseia em princípios consolidados da cinemática clássica e na análise da coincidência espaço-temporal das trajetórias dos veículos envolvidos. Dessa forma, a validade conceitual do método decorre diretamente das equações que descrevem o movimento e da condição física necessária para a ocorrência de colisões. As análises apresentadas demonstraram a aplicabilidade prática da abordagem no contexto pericial. A análise da sobreposição das distribuições gaussianas dos tempos de chegada permitiu interpretar os resultados não apenas de forma determinística, mas também em termos de compatibilidade estatística entre os tempos de chegada dos veículos ao sítio de colisão, incorporando explicitamente as incertezas inerentes às variáveis estimadas.

A ampliação do número de estudos de caso e a aplicação em diferentes cenários podem contribuir para aprofundar a avaliação de sua robustez e de seus limites operacionais.

Mesmo quando os resultados absolutos indicam diferenças aparentemente pequenas entre os tempos de chegada, a análise conjunta das variáveis de espaço e

tempo representa de forma mais fiel a natureza dinâmica das movimentações veiculares. Nesse contexto, a abordagem temporal proposta introduz um critério baseado na coincidência espaço-temporal para a análise da evitabilidade, contribuindo para uma interpretação mais consistente da dinâmica dos acidentes de trânsito.

6. CONCLUSÕES

A análise da evitabilidade em acidentes de trânsito está tradicionalmente associada à comparação entre a distância disponível no cenário e a distância necessária para a parada do veículo. Embora essa abordagem espacial seja amplamente utilizada na prática pericial e apresente utilidade em diversos cenários, ela não contempla explicitamente a evolução temporal do movimento dos veículos envolvidos.

A incorporação da variável tempo na análise da evitabilidade permite avaliar se os veículos efetivamente ocupariam a mesma região do espaço no mesmo instante, condição física necessária para a ocorrência da colisão.

A abordagem temporal proposta neste trabalho torna possível identificar situações em que trajetórias aparentemente conflitantes sob a perspectiva espacial não resultariam em colisão quando analisadas sob a ótica da coincidência espaço-temporal.

Além disso, o método permite examinar cenários nos quais a evitabilidade pode ser discutida mesmo sem exigir, necessariamente, uma ação reativa do condutor, desde que se conheçam as trajetórias, velocidades e tempos relevantes para a dinâmica analisada. Essa característica amplia o escopo da análise pericial, permitindo avaliar a influência do excesso de velocidade na própria formação da condição de conflito entre os envolvidos.

Sob essa perspectiva, a análise baseada na variável tempo tende a representar de forma fiel a dinâmica real dos acidentes de trânsito quando comparada à abordagem exclusivamente espacial. Enquanto o método tradicional fundamenta-se predominantemente na comparação entre distâncias, o método temporal incorpora explicitamente a evolução do movimento ao longo do tempo, permitindo verificar se os veículos envolvidos efetivamente atingiriam a região de conflito no mesmo instante, reduzindo ambiguidades inerentes à análise puramente geométrica, possibilitando uma avaliação mais precisa da plausibilidade física do evento investigado.

Embora os resultados obtidos indiquem o potencial da abordagem proposta para aprimorar a análise pericial da evitabilidade, estudos adicionais envolvendo maior número de ocorrências e diferentes configurações de acidente são desejáveis para ampliar a validação empírica do método.

A abordagem proposta reinterpreta a análise da evitabilidade sob a perspectiva da coincidência espaço-

temporal das trajetórias, condição física necessária para a ocorrência de colisões, aproximando a análise pericial dos princípios fundamentais da cinemática.

Espera-se, portanto, que a abordagem temporal apresentada neste trabalho amplie as ferramentas metodológicas disponíveis para a avaliação técnica da evitabilidade nas análises periciais em acidentes de trânsito e aproxime a prática analítica dos modelos empregados em reconstruções computacionais de acidentes.

AGRADECIMENTOS

À Perita Criminal Msc. Monica Gabrielle Paêlo pela revisão científica deste trabalho e pelas contribuições ao seu aprimoramento técnico.

Ao Perito Criminal Pedro Augusto Silva de Oliveira pelas análises, discussões e sugestões oferecidas durante a elaboração deste artigo, bem como pelo compartilhamento de casos reais para análise sob a metodologia proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. L. Almeida. *Manual de perícias em acidentes de trânsito*. 2. ed. – Campinas, SP: Millennium, 2014.
- [2] R. F. Aragão. *Acidentes de trânsito: análise da prova pericial*. 6. ed. – Campinas, SP: Millennium, 2016.
- [3] O. Negrini Neto; R. Kleinubing. *Dinâmica dos acidentes de trânsito*. 5. ed. - Campinas, SP: Millennium, 2023.
- [4] W. Toresan Jr.; N. Didyk. *Reconstrução de colisões veiculares*. Curitiba, PR: Ed. dos Autores, 2024.
- [5] P. A. Tipler; G. Mosca. *Physics for scientists and engineers*. W.H. Freeman, 2008.
- [6] J. C. Hayward. *Near miss determination through use of a scale of danger*. Highway Research Record, n. 384, 1972.
- [7] D. N. Lee. *A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision*. *Perception*, v. 5, p. 437–459, 1976.
- [8] R. Van Der Horst. *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. Delft University, 1990.
- [9] S. M. Ross. *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. Academic Press, 2014.
- [10] R. M. Brach; M. R. Brach. *Vehicle accident analysis and reconstruction methods*. SAE, 2011.
- [11] R. Limpert. *Motor vehicle accident reconstruction and cause analysis*. Charlottesville: The Michie Company, 1999.
- [12] L. B. Fricke. *Traffic accident reconstruction*. Evanston: Northwestern University Traffic Institute, 1990.

- [13] W. S. Reed; A. T. Keskin. *Vehicular deceleration and its relationship to friction*. SAE 890736, 1989.
- [14] W. S. Reed; A. T. Keskin. *Vehicular response to emergency braking*. SAE 870501, 1987.
- [15] J. A. Neptune. *Speed from skids: A modern approach*. SAE 950354, 1995.
- [16] PROMOCYCLE FOUNDATION. *Performance evaluation for various braking systems of street motorcycles*. 2003.
- [17] W. Bartlett; A. Baxter; N. Robar. *Motorcycle braking tests: IPTM Data Through 2006*. ARJ, 2007.
- [18] R. Y. Rubinstein; D. P. Kroese. *Simulation and the Monte Carlo method*. 2. ed. New York: Wiley, 2008.
- [19] MICROSOFT. *Microsoft Excel*. Redmond, WA: Microsoft Corporation, 2023.
- [20] eCRASH – Software de reconstrução de acidentes. Disponível em: <https://www.ecrash.com.br>. Acesso em: março de 2026.
- [21] J. W. Muttart; S. Dinakar. *Driver's response in emergency situations: A quick reference*, 3rd ed., 2023.