

# Estimativa da velocidade em colisões a partir da rotação do motor em casos de “congelamento” do ponteiro do velocímetro

E.L. dos Reis <sup>a, \*</sup>, A.M.B. Fontoura <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Criminalística Hercílio Macellaro (ICHM), Coordenadoria Geral de Perícias, Campo Grande (MS), Brasil

\*Endereço de e-mail para correspondência: [elrjola@hotmail.com](mailto:elrjola@hotmail.com). Tel.: +55-67-99166-0864.

Recebido em 05/07/2023; Revisado em 02/04/2024; Aceito em 02/04/2024

## Resumo

A perícia em acidente de trânsito busca reconstruir a dinâmica de um determinado evento. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta uma nova abordagem na análise do “congelamento” do ponteiro do velocímetro de um veículo envolvido em colisão, ampliando os horizontes do conhecimento e da interpretação dos vestígios pelo Perito Criminal. O valor de rotação do motor é um parâmetro valioso, pois permite estimar o valor de velocidade e confrontá-lo com aquele apresentado pelo velocímetro do veículo. Um estudo de caso é apresentado ao leitor, de forma prática, como um guia para relacionar as variáveis cinemáticas do evento, possibilitando o cálculo da velocidade das unidades móveis envolvidas, colaborando, portanto, na elaboração de dinâmicas de extrema complexidade.

*Palavras-Chave:* Acidente de trânsito; “congelamento” do velocímetro; Rotação do motor; Reconstrução de acidentes; Interpretação de vestígios.

## Abstract

Traffic accident expertise quest for the reconstruction of an event dynamics. In this way, the present work introduces a new approach in “frozen speedometer” analysis, enlarging the perspective of knowledge and evidence reading by the expert. Engine rotation is a valuable parameter, because it allows to face the velocity during the collision with the one presented by the vehicle speedometer. A case report is depicted to the reader, in a practical way, as a guide to correlate the event cinematic variables, granting him to calculate the traffic units’ velocity, contributing for the recreation of extreme complex dynamics.

*Keywords:* Traffic Accident; Frozen Speedometer; Engine rotation; Traffic Accident Reconstruction; Evidence reading.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das premissas do trabalho pericial é buscar a verdade real relacionada aos fatos. Para isso, o exame pericial deve ser executado de forma sistemática, respeitando as nuances do método científico, seguindo a um conjunto ordenado de procedimentos e baseando-se na ciência e na lógica, sob a ótica da Criminalística [1].

Nesse ambiente, destaca-se a perícia de acidente de trânsito, cujo principal objetivo é reconstruir a dinâmica de um determinado evento. Entende-se como evento o resultado de uma ação em que os partícipes são aqueles que circulam pelas vias terrestres, como pedestres, veículos ou, até mesmo, os animais.

Diante desse cenário, um dos óbices desse tipo de perícia é constatar e interpretar corretamente os vestígios presentes sob um vasto campo de observação a ser decifrado, como são as peças de um quebra-cabeça, por

aqueles que labutam e executam seu mister no dia a dia: os peritos criminais brasileiros.

De um lado, as precárias condições de visibilidade, a precipitação pluviométrica, a condição e a natureza do pavimento, a extensão da via, a efemeridade dos vestígios deixados sobre ela, e, por vezes, a ausência da unidade móvel envolvida no acidente são fatores que dificultam a interpretação durante o levantamento do local exigindo experiência por parte do Perito durante sua análise.

Por outro lado, a presença, de diversas soluções tecnológicas, no mercado, tais como os scanners 3D, os VANTs (veículos aéreos não tripulados), as lanternas de alta luminosidade, as trenas a laser, as técnicas de fotogrametria e câmeras de alta definição permite eternizar e, posteriormente, recriar, de maneira cada vez mais fidedigna, o local palco do evento.

Durante a interação entre unidades móveis, a velocidade exerce um importante papel, pois, além de

impactar diretamente na gravidade das avarias e lesões resultantes do evento, permite, ainda, a interpretação dos vestígios pelo perito, o qual deve traçar a dinâmica mais fundamentada possível para essa interação.

Sob esse pano de fundo, um valioso vestígio é o “congelamento” do ponteiro do velocímetro de um veículo, já que ele pode evidenciar a velocidade de um veículo no instante de uma colisão. Para tanto, cabe ao perito de local antecipar quais condições necessárias devem estar presentes e, sobretudo, as limitações dos métodos aplicados para que esse efeito possa ser notório e ganhar sua atenção.

Em primeiro plano, o perito deve saber que esse tema só é relevante quando o problema envolve o estudo de velocímetros eletrônicos. Esses instrumentos são assim definidos por apresentarem motor de passo controlado eletronicamente, embora, a priori, exibam em sua interface elementos ditos analógicos: os ponteiros.

Em seguida, é preciso avaliar o “congelamento” dos ponteiros da velocidade e da rotação do motor. Considerando o sistema de transmissão manual de um veículo e as dimensões da roda, o modelo proposto possibilita estimar a velocidade do veículo e confrontá-la com o valor indicado no painel de instrumentos, quando do “congelamento” do ponteiro do velocímetro.

Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma formulação matemática baseada tanto nas características do veículo periciado quanto nos valores de velocidade e rotação observados no painel de instrumentos. De maneira prática, será apresentado um estudo de um caso em que a perita de local evidenciou o “congelamento” do ponteiro do velocímetro digital em decorrência de uma colisão.

## 2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Nos últimos anos, a indústria automobilística foi submetida a uma considerável evolução tecnológica, sobretudo no Brasil, cujos impactos refletem diretamente nas técnicas periciais abordadas pelos peritos em seu mister. Nesse panorama, a evolução dos métodos aplicados em um exame pericial é primordial para acompanhar as tendências desse mercado.

Dentre as muitas evoluções que surgiram, pode-se citar os velocímetros dos veículos automotores, atualmente constituídos por um sistema eletrônico. Os velocímetros atuais, em sua grande maioria, são, inclusive no mercado brasileiro, controlados pela central eletrônica do veículo. O movimento do ponteiro, visível ao condutor, é controlado por um motor elétrico de precisão, chamado *motor de passo*.

O funcionamento dos velocímetros eletrônicos foi abordado por Reis [2]. Em seu trabalho, o autor defende que o “congelamento” do ponteiro, controlado pelo motor de passo, se dá a partir do momento em que cessa sua fonte

de alimentação. Neste caso, diferentemente dos velocímetros mecânicos e eletromecânicos, não existe uma mola acoplada ao ponteiro para retrá-lo até a posição zero, quando da falta de energia. Consequentemente, o ponteiro do velocímetro permanece “congelado” na mesma posição.

Abordou-se, no presente trabalho, uma nova perspectiva desse tema, ao considerar como ponto de partida o “congelamento” do ponteiro que indica a frequência de rotação do motor do veículo em determinada marcha, permitindo confrontar, por meio de um modelo proposto, o valor da velocidade no instante da colisão, estimado a partir do valor de rotação e de outros parâmetros envolvidos, com o valor apontado diretamente no painel de instrumentos do veículo através de seu ponteiro do velocímetro.

## 3. METODOLOGIA

A construção do modelo matemático deste trabalho considerou a interação dos componentes do sistema de transmissão de um veículo, cuja dinâmica é de extrema complexidade, devido ao elevado número de variáveis envolvidas.

É primordial compreender fisicamente os fatores envolvidos na cadeia de eventos que se sucedem durante as interações, buscando simplificá-los, ao mesmo tempo em que são avaliadas sua aplicabilidade e suas limitações.

Com o objetivo de simplificar o modelo proposto, considera-se, inicialmente, apenas os veículos dotados de um sistema de câmbio manual, pois nele é possível aferir a marcha pela posição da alavanca de câmbio, bem como a relação de marcha a ela associada. Além disso, o veículo deve apresentar como tecnologia os velocímetros digitais, os quais, durante um evento no qual há interrupção do fornecimento de energia elétrica, têm seu ponteiro “congelado”, isto é, sem retornar para a posição inicial (zero).

Ao ser transmitido por cada um dos componentes, o torque do motor é reduzido. Portanto, para considerar a redução total sofrida nesse sistema, é preciso avaliar o produto das eficiências individuais de cada componente, conforme apresenta Marshall [3] em seu trabalho. Segundo Smith [4], os valores de eficiência variam largamente para cada nível de torque aplicado, porque as perdas ocorrem mesmo com torque nulo. Como uma regra prática, as eficiências se concentram no intervalo entre 80% até 90%, tipicamente aplicada para caracterizar o sistema de transmissão.

A potência é transmitida ao longo dos componentes do sistema de transmissão, partindo do volante do motor até chegar em suas rodas. A partir daí, basta estimar a velocidade do veículo, aproximando-a pelo valor em uma das rodas, considerando, de maneira idealizada, que todas as rodas desenvolvam a mesma velocidade.

Wolfgang Borutzky [5] ressalta que, ao tratar-se da transmissão de potência, para cada domínio de energia considerado, a quantidade de potência transferida será definida pelo produto de duas quantidades físicas, as chamadas de *variáveis de esforço e variáveis de fluxo*. No domínio mecânico, a potência é definida, classicamente, como o produto entre a força e a velocidade linear, ou pelo torque e velocidade angular, na mecânica de rotação, isto é:

$$P = Fv \text{ ou } P = Tw \quad (1)$$

Ainda, Wolfgang apresenta duas analogias entre sistemas mecânicos e elétricos, as chamadas analogia clássica e a analogia dual. A última foi proposta por Firestone [6] em 1933, enquanto a primeira é conhecida há mais de um século.

Na analogia clássica, adotada pelos autores deste trabalho devido a sua simplicidade, as forças e torques são considerados variáveis de esforço, enquanto as velocidades lineares e angulares são consideradas variáveis de fluxo.

Diante disso, ao estimar a velocidade da roda foi adotada a conservação da potência transmitida, de forma que a relação matemática encontrada é função tão somente das variáveis de *fluxo* (velocidade linear, velocidade angular etc.) e das características construtivas do veículo (diâmetro das rodas, relação de marcha e diferencial etc.).

Por isso, foi possível negligenciar os efeitos dissipativos do sistema de transmissão, uma vez que esses efeitos se concentram, majoritariamente, nas variáveis de esforço (torques dos semieixos, forças que atuam nas rodas etc.) não afetando as variáveis de fluxo das quais depende o modelo proposto.

#### 4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO VEICULAR

Existem dois tipos de transmissão veicular: a manual e a automática.

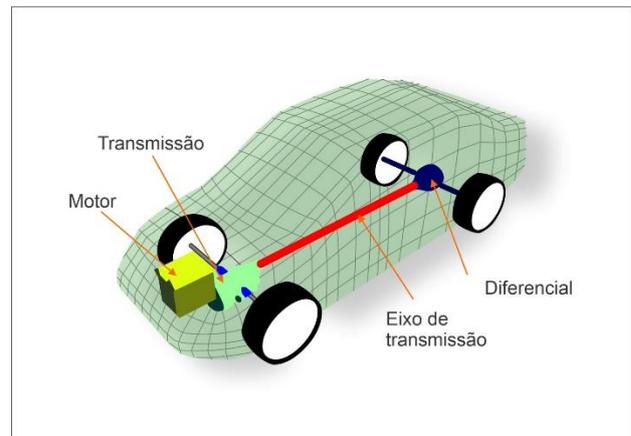
Na transmissão manual, o condutor dispõe de um pedal de embreagem, devendo acioná-lo de forma manual para trocar a marcha. Esta troca é feita quando o motor atinge uma determinada rotação ou quando o motorista quer voluntariamente imprimir mais torque ao motor.

Já na transmissão automática, a troca de marcha é realizada automaticamente, isto é, sem a presença do pedal de embreagem no assoalho do motorista.

O motor do carro a combustão transforma energia química em energia cinética, sobretudo movimentos rotacionais. Essas rotações produzidas pelo motor são transmitidas até as rodas do veículo pelo sistema de transmissão.

Os componentes do sistema de transmissão são ilustrados, de maneira simplificada, na [Figura 1](#). São eles:

a embreagem, a caixa de câmbio, o eixo de transmissão, o diferencial, as rodas e os pneumáticos.



**Figura 1.** Ilustra os componentes do sistema de transmissão de um veículo com tração traseira. Fonte: Dos autores.

Por meio desse sistema, a rotação produzida no motor pode ser transmitida para a caixa de câmbio, de acordo com a marcha selecionada.

#### 4.1. A embreagem

A embreagem do carro é o primeiro componente do sistema de transmissão. De forma muito simplificada, pode-se compará-lo a dois discos fortemente pressionados um contra o outro. O primeiro fica conectado ao volante do motor enquanto o segundo resta conectado ao eixo de entrada, também chamado de eixo primário da caixa de câmbio.

Quando o condutor pisa no pedal da embreagem, os discos se afastam, desacoplando do motor a caixa de câmbio, interrompendo a transmissão do torque gerado no motor. Ao soltar o pedal da embreagem, os discos se acoplam permitindo que o motor transmita certa rotação para a caixa de câmbio. É papel desta última retransmitir a rotação para os demais componentes do veículo até chegar em suas rodas. Para o correto funcionamento desse sistema é preciso que em sua montagem estejam presentes componentes como rolamentos, tampa, platô, parafuso de retenção, mola de amortecimento torcional, rebites, dentre outros, conforme ilustra a [Figura 2](#).



**Figura 2.** Vista explodida de componentes da embreagem. Fonte: Dos autores.

#### 4.2. A caixa de câmbio

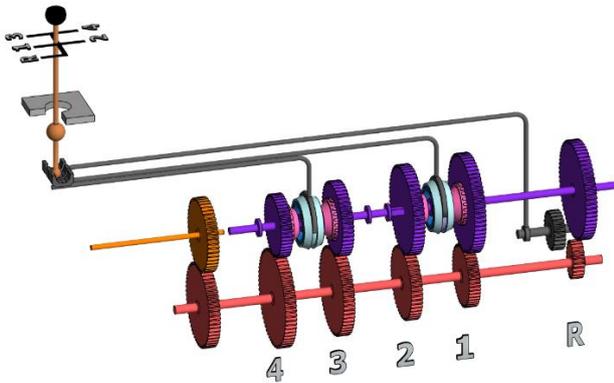
Na caixa de câmbio é onde ficam comportados os sistemas de engrenagens ou polias que formarão o conjunto de marchas do veículo. No caso das transmissões manuais, a alavanca do câmbio também se conecta a esse sistema, de forma a permitir as trocas de marchas.

Como se observa na **Figura 3**, as marchas estão situadas no interior da caixa de câmbio e nada mais são do que sistemas de engrenagens acopladas. Cada marcha é um tipo de acoplamento entre determinado conjunto de engrenagens, cujo tamanho e número de dentes definem o conceito de relação de marcha.

O principal objetivo da caixa de câmbio é alterar a rotação produzida pelo motor, conceito que pode ser traduzido como “relação de marcha”.

O eixo primário da caixa de câmbio, em coloração laranja na **Figura 3**, recebe a rotação do motor, a qual é transformada segundo a relação de marcha que está selecionada (por meio da manopla de câmbio). Portanto, por meio de um eixo de transmissão, a nova rotação é transmitida para o diferencial.

O diferencial também possui, grosso modo, uma “relação de marcha”, pois trabalha com sistemas de engrenagens em seu interior, que apesar de serem geralmente de construção cônica, são, do ponto de vista matemático, muito semelhantes às caixas de câmbio. Dessa maneira, o diferencial modifica a rotação recebida da caixa de câmbio, transmitindo-a, em seguida, para as rodas do veículo.



**Figura 3.** Ilustra os componentes internos da caixa de câmbio manual em um veículo de 4 marchas mais a marcha à ré. Fonte: Dos autores.

#### 4.3. O diferencial

O diferencial do carro é composto basicamente por duas engrenagens: a coroa e o pinhão.

Sendo uma das partes mecânicas mais complexas e importantes da transmissão, é basicamente um conjunto de engrenagens que, combinadas entre si, dividem a potência do motor entre as rodas, além de garantir que, nas curvas, elas possam girar em velocidades diferentes.

Isso é possível porque essa divisão de potência, principalmente nas curvas, é desuniforme sendo controlada a todo momento pelo diferencial.

No caso particular de uma trajetória retilínea, o diferencial transmite às rodas uma rotação uniforme.



**Figura 4.** Elementos do diferencial. Fonte: Dos autores.

Dentre os modelos de diferencial presentes nos veículos automotores, destacam-se os posicionados sobre o eixo traseiro e aqueles posicionados na saída da caixa de marcha. Como é composto basicamente de duas engrenagens acopladas, existe no diferencial uma relação engrenagem tal qual na caixa de câmbio. Aqui, de forma didática, pode-se chamar de *relação de diferencial*.

Esquemáticamente, o diferencial recebe a rotação vinda do eixo que sai da caixa de câmbio, faz a redução da velocidade de rotação pela relação de engrenagem específica e retransmite essa rotação para as rodas tracionadas (aquelas responsáveis pela impulsão do veículo para frente).

Em geral, nos veículos de passeio, essas rodas são as do eixo dianteiro, mas existem automóveis com a tração feita pelas rodas do eixo traseiro ou mesmo a tração integral, comercialmente conhecida por tração 4x4.

É importante o leitor atentar-se para a seguinte sequência:

- 1) Inicialmente, a rotação do motor é transmitida pelo sistema de embreagem até a caixa de câmbio;
- 2) Para uma determinada marcha, a caixa de câmbio é capaz de transmitir a rotação recebida até seu eixo de saída conforme a relação de engrenagem considerada naquela marcha;
- 3) Por fim, a rotação do eixo de saída da caixa de câmbio é transmitida até o diferencial, que, por meio de sua relação, transmite uma rotação para as rodas;
- 4) Conhecendo a rotação de uma das rodas, é possível estimar a velocidade do veículo, considerando que a velocidade nas quatro rodas é aproximadamente uniforme.

Para tanto, é preciso conhecer as dimensões da roda e as especificações do pneumático utilizado no veículo, já que existe uma relação direta entre a velocidade linear e a velocidade angular, em função do raio da roda.

A relação entre grandezas angulares e lineares, tais como a velocidade linear ( $v$ ), a velocidade angular ( $w$ ) e o raio da roda ( $R$ ), é dada por:

$$v = wR \quad (2)$$

Entretanto, ao adotar os conceitos relativos aos movimentos circulares, é possível explicitar a velocidade angular ( $w$ ) em função da frequência ( $f$ ) como sendo:

$$w = 2\pi f \quad (3)$$

Considerando as Eq. 2 e 3, a velocidade linear ( $v$ ) é dada por:

$$v = 2\pi Rf \quad (4)$$

Sabe-se que o comprimento ( $C$ ) de uma circunferência pode ser definido por:

$$C = 2\pi R = \pi D \quad (5)$$

Logo, a velocidade linear ( $v$ ) pode ser finalmente representada em função da frequência da rotação da roda, por meio da equação abaixo:

$$v = Cf_{RODA} \quad (6)$$

#### 4.4 As rodas e seus pneumáticos

As rodas dos veículos são constituídas de material metálico, geralmente de ferro ou outra liga metálica leve, as chamadas rodas de liga leve.

Os pneumáticos, por sua vez, são constituídos essencialmente por borracha na parte externa, a qual mantém contato com a superfície, chamada de banda de rodagem.

Os pneumáticos utilizam a pressão do ar armazenado no seu interior para suportar carga, apresentando como principais elementos a carcaça, que forma a estrutura de suporte do pneu, e a banda de rodagem, que entra em contato com o solo, transmitindo esforços longitudinais de tração e frenagem absorvendo os esforços transversais ocasionados pela ação do vento ou por forças de inércia em curvas e pistas inclinadas lateralmente.

Existem diversos tipos construtivos de pneus, a depender de como carcaça é formada.

As duas estruturas mais comuns no mercado de pneus são os pneus de carcaça diagonal e os pneus de carcaça radial. A diferença básica entre eles está na disposição dos cordéis, os quais formam as lonas que compõem a carcaça.

Os pneumáticos de construção diagonal têm os cordéis dispostos de forma diagonal em relação ao plano de rodagem. Já na construção radial, os cordéis estão dispostos de forma perpendicular ao plano de rodagem.

Essa diferença na disposição dos cordéis proporciona características bem distintas entre os pneumáticos, tanto em conforto, quanto em desempenho sob carga.

A seguir são apresentadas algumas vantagens e desvantagens dos pneus radiais em relação aos diagonais, segundo [7]:

Vantagens:

- Maior durabilidade;
- Menor resistência ao rolamento;
- Maior conforto quando em altas velocidades;
- Melhor absorção das forças laterais;
- Maior estabilidade direcional;
- Menor sensibilidade à aquaplanagem.

Desvantagens:

- Menor conforto quando em baixas velocidades;
- Maior custo de fabricação.



Figura 5. Ilustra os tipos de construção dos pneumáticos.

Fonte: Dos autores.



Figura 6. Ilustra as dimensões dos pneumáticos. Fonte: Dos autores.

A Figura 6 ilustra um modelo de pneumático. É possível inferir do esquema as medidas 255/60 R 18, informações fornecidas pelos fabricantes em todos os tipos de pneumáticos dispostas em sua porção lateral. O primeiro valor, neste caso 255, se refere à largura  $W$  do pneumático, valor dado em milímetros.

O segundo valor, neste caso 60, é uma razão entre a altura ( $H$ ) e a largura ( $W$ ). Esta relação geométrica de construção também é conhecida como *razão de aspecto*. Neste caso em particular, a razão de aspecto deve ser

ajustada para seu valor percentual, ou seja, com valor de 60%, lembrando que ela é adimensional.

Dessa forma, pode-se definir a razão de aspecto (RA) pela seguinte relação:

$$RA = 100 * \frac{H}{W} \quad (\%) \quad (7)$$

Aplicando-se a Equação 7 em conjunto com as informações obtidas na Figura 6, pode-se calcular a altura lateral do pneumático (H) como:

$$H = \frac{(W).(RA)}{100} = 15,3 \text{ cm} \quad (8)$$

A construção radial é indicada nas informações do pneumático com a letra “R”, enquanto a construção dita diagonal é indicada pela letra “D”.

O último valor das especificações da Figura 6 é o 18. Esse valor indica o diâmetro da roda e é dado em polegadas.

Para esse caso específico, por meio do fator de conversão, é possível estimar seu valor em centímetros, conforme a relação:

$$d = 18 * 2,54 = 45,72 \text{ cm} \quad (9)$$

#### 4.5 Relação de marcha

Quando duas engrenagens estão acopladas, elas irão girar em velocidades diferentes, caso possuam parâmetros de fabricação distintos. Quando uma marcha é selecionada, o sistema de embreagem acopla a caixa de marcha ao volante do motor e as engrenagens da referida marcha começam a girar. Uma das engrenagens recebe a rotação do eixo, essa é denominada de motora e a outra engrenagem que está acoplada à primeira passa a girar, essa engrenagem é chamada de movida. Isso é válido para cada uma das marchas existentes em um veículo.

A relação de marcha é definida pela razão entre as velocidades rotacionais entre as duas engrenagens, a motora e a movida [8]. De maneira geral, no acoplamento entre duas engrenagens, se a primeira (que recebe a força rotacional diretamente do motor) é maior do que a segunda, esta última irá girar mais rápido. Matematicamente, esse conceito pode ser traduzido pela relação:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (10)$$

Na Equação 10,  $f$  é a frequência de rotação e  $Z$  é o número de dentes de cada engrenagem. Nota-se a relação inversamente proporcional entre o número de dentes e a frequência de rotação, pois a engrenagem com maior número de dentes deve girar com menor frequência (mais lentamente).

A critério de exemplo, seja uma engrenagem contendo 11 dentes acoplada à outra contendo 38 dentes. A relação entre elas se torna:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{38}{11} = 3,45 \quad (11)$$

Isso significa que a engrenagem motora, aquela recebe a rotação do motor, vai girar 3,45 voltas enquanto a movida, aquela que transmite a rotação para frente, completa apenas uma volta. Isso é exatamente o que acontece na primeira marcha de um carro.

Além disso, é possível relacionar diretamente a velocidade e o torque: à medida que a velocidade de rotação é dividida, o torque ou força são multiplicados. Isso ocorre devido à conservação de potência, definida como o produto entre força e velocidade (a força sendo uma variável de esforço e velocidade uma variável de fluxo). Por isso, a primeira marcha é chamada de marcha curta, pois a velocidade não atinge grandes patamares, mas possui torque suficiente para colocar o carro em movimento ou para subir uma ladeira, por exemplo.

Conforme o operador pisa no acelerador em primeira marcha, o motor eleva o giro, fato indicado pelo ponteiro que indica a rotação do motor em RPM. Mas o carro não atinge grandes velocidades, pois, em primeira marcha, o câmbio desmultiplica a rotação do motor. A engrenagem que recebe a rotação gira rápido, mas está acoplada em outra com maior número de dentes que vai girar mais devagar, conforme ilustra o esquema abaixo:

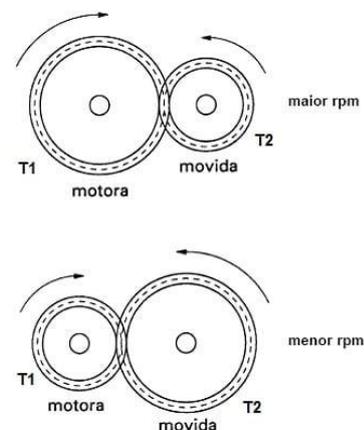


Figura 7. Ilustra a relação de engrenagem e a frequência de cada engrenagem. Fonte: Dos autores.

#### 4.6 Metodologia para o cálculo da velocidade

Para o cálculo da velocidade do pneumático é preciso iniciar o cálculo pela estimativa de seu diâmetro.

É preciso considerar a soma do diâmetro da roda e o dobro da altura H de sua lateral. Assim:

$$D = d + 2H = 76,32 \text{ cm} \quad (12)$$

Devido a carga a que está submetido, o pneumático sofre certa deformação a qual reduz uma parcela de seu

diâmetro. Como correção é aplicado uma redução de 5% [7], conforme a relação:

$$D_{real} = D * 0,95 = 75,5 \text{ cm} \quad (13)$$

No sistema internacional de unidades (SI), a frequência é representada pela unidade Hertz (Hz). Na física do movimento circular, sua definição é “o número de voltas dentro do intervalo de um segundo”.

Conforme mostrado no trabalho de Gillespie [8], a aceleração rotacional do motor, da transmissão e dos eixos, pode ser relacionada por:

$$\alpha_{Motor} = \alpha_{RODAS} * R_{C\grave{A}MBIO} * R_{DIFERENCIAL} \quad (14)$$

Em que R é a relação de marcha que pode ser aplicada tanto na caixa de câmbio quanto no diferencial. Além disso, sabe-se que a aceleração rotacional é relacionada à velocidade angular ( $\omega$ ), e esta pela frequência de rotação. Considerando essas relações é possível mostrar que:

$$f_{MOTOR} = f_{RODAS} * R_{C\grave{A}MBIO} * R_{DIFERENCIAL} \quad (15)$$

Em busca de uma relação entre a frequência do motor e a velocidade nas rodas, deduz-se, inicialmente, uma relação entre a frequência de rotação do motor,  $f_{MOTOR}$ , e a frequência de rotação do eixo de saída da caixa de câmbio,  $f_{C\grave{A}MBIO}$ . A partir da Eq. 10, mostra-se que:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \Rightarrow \frac{f_{MOTOR}}{f_{C\grave{A}MBIO}} = \frac{Z_2}{Z_1} = R_{C\grave{A}MBIO} \quad (16)$$

Conforme discutido anteriormente, a razão entre o número de dentes das engrenagens componentes do câmbio, fixada uma posição conhecida da alavanca de câmbio, é numericamente igual a relação de marcha. Sendo assim, basta aplicar o mesmo raciocínio entre o eixo que conecta o câmbio ao diferencial, o qual também possui uma relação de marcha, chamada de relação de diferencial. Considerando que as engrenagens do diferencial transmitam a mesma rotação para as rodas, a relação do diferencial é dada por:

$$\frac{f_{C\grave{A}MBIO}}{f_{RODA}} = R_{DIFERENCIAL} \quad (17)$$

Diante do exposto, a partir da combinação das Eq. 16 e 17, pode-se obter a seguinte expressão:

$$\frac{f_{MOTOR}}{f_{C\grave{A}MBIO}} * \frac{f_{C\grave{A}MBIO}}{f_{RODA}} = R_{C\grave{A}MBIO} * R_{DIFERENCIAL} \quad (18)$$

Por fim, considerando as Equações 6 e 18, mostra-se que a velocidade do veículo pode ser calculada como sendo:

$$v = C f_{RODA} \Rightarrow v = \frac{C(m) * f_{MOTOR}(Hz)}{R_{C\grave{A}MBIO} * R_{DIFERENCIAL}} \quad (19)$$

em que  $v$  é a velocidade do veículo em metros/segundo,  $C$  é o comprimento da circunferência do pneumático em metros,  $f_{MOTOR}$  é a frequência de rotação do motor do veículo em Hertz,  $R_{C\grave{A}MBIO}$  é a relação de marcha do câmbio, para uma marcha selecionada, e  $R_{DIFERENCIAL}$  é a relação do diferencial instalado naquele veículo.

Caso seja empregada a frequência do motor em RPM, utiliza-se a fórmula acima adequando-se às unidades, por meio de um fator de conversão, assim:

$$V = 0,06 * \frac{C(m) * f_{MOTOR}(RPM)}{R_{TRANSMISS\tilde{A}O} * R_{DIFERENCIAL}} \quad (20)$$

Na equação acima, o fator 0,06 é aplicado para transformar as grandezas m/min em km/h, atentando-se para a utilização do Sistema Internacional (SI). Por fim, a frequência  $f$  (em RPM) pode ser visualmente avaliada pela simples análise do ponteiro do painel de instrumentos do veículo.

A Equação 20 é contribuição deste trabalho para estimar a velocidade do veículo no instante da colisão. Ela se baseia nos parâmetros geométricos construtivos dos pneumáticos utilizados, no valor da rotação do motor e, finalmente, nos parâmetros de projeto tanto do diferencial quanto da caixa de câmbio, representados fisicamente pelas suas relações de transmissão  $R_{C\grave{A}MBIO}$  e de diferencial  $R_{DIFERENCIAL}$ .

A relação de transmissão vai depender da composição do sistema de transmissão. Caso ele seja composto de apenas uma caixa de câmbio, a relação de transmissão será idêntica à relação de marchas. Em casos com diversas caixas de câmbios acopladas, caixas redutoras e/ou multiplicadoras presentes ao longo do sistema de transmissão, a relação de transmissão será fornecida pelo produto das relações de marcha de cada um dos componentes. Ou seja, de forma generalizada, para  $N$  componentes com suas respectivas reduções de marcha  $R_{mi}$  (i partindo de 1 até  $N$ ):

$$R_{C\grave{A}MBIO} = R_{m1} * R_{m2} * \dots * R_{mN} \quad (21)$$

A mesma ideia é válida para os diferenciais. Entretanto, combinar sucessivas caixas de câmbio ou diferenciais não é comum do ponto de vista prático. Isso ocorre por que, geralmente, os veículos apresentam apenas uma caixa de câmbio e um diferencial.

#### 4.7. Estudo de caso

Nesta seção é apresentado um caso de aplicação prática envolvendo o modelo proposto neste trabalho,

representado matematicamente pela relação constante na Equação 20.

Um veículo da marca Volkswagen, modelo GOL CITY, ano-modelo 2013, câmbio manual, com uma relação de marcha e uma relação de diferencial bem definidas e tabeladas pelo fabricante, colidiu com sua parte frontal na porção traseira de um caminhão (Figuras 8-10). Os ponteiros presentes em seu painel permaneceram “congelados” conforme ilustra a Figura 11.



**Figura 8.** Ilustra o estado do veículo VW GOL após o evento. Fonte: Dos autores.



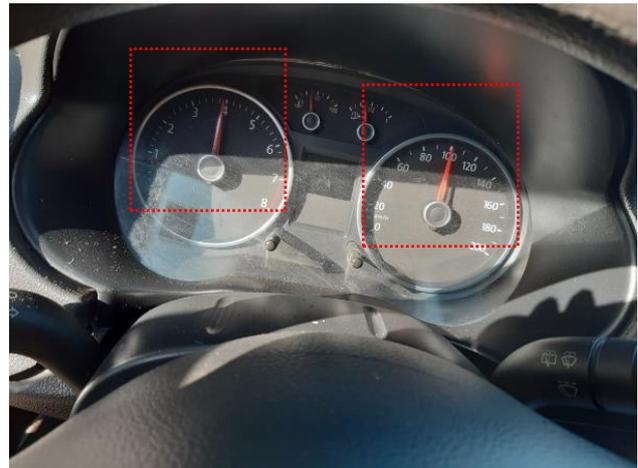
**Figura 9.** Ilustra vista da lateral direita do veículo VW Gol. Fonte: Dos Autores.



**Figura 10.** Ilustra a deformação na parte frontal do veículo envolvido na colisão, com avarias de grande monta na região onde está localizada a alimentação do sistema elétrico. Fonte: Dos Autores.

O ponteiro do velocímetro apresenta um valor ligeiramente acima de 100 km/h. Entretanto, é preciso

levar em conta o erro de paralaxe relacionado à angulação e à perspectiva da fotografia.



**Figura 11.** Ilustra painel do veículo periciado com destaque para os ponteiros do velocímetro e de rotação do motor “congelados”. Fonte: Dos autores.

O valor da rotação do motor está indicado pelo “congelamento” do ponteiro em torno de 4.000 RPM.

A perita de local verificou que o veículo estava engatado em sua 5ª marcha e que os pneumáticos tinham medidas de 175/65/R 14, conforme ilustra a Figura 12.



**Figura 12.** Ilustra as medidas do pneumático montado no veículo envolvido no acidente, em destaque no retângulo vermelho os algarismos 175/65 R14. Fonte: Dos autores.

Ao consultar o manual do veículo envolvido no sinistro, verificou-se os seguintes valores para a relação do câmbio e do diferencial, respectivamente:

$$R_{\text{C\^A}M\text{B}I\text{O}} = 0,776 \quad (22)$$

$$R_{\text{D}I\text{F}E\text{R}E\text{N}C}I\text{A}L = 4,929 \quad (23)$$

Em posse desses dados, pode-se aplicar a metodologia apresentada na Eq. 20 para estimar o valor de velocidade do veículo no momento da colisão. Para isso, utiliza-se o valor de rotação do motor (RPM) apresentado pela agulha quando do instante da colisão, conforme ilustra a Figura 11.

Com isso, para as medidas do pneumático obtém-se:

$$H = \frac{RA*W}{100} = 11,375 \text{ cm} \quad (24)$$

$$d = 14 * 2,54 = 35,56 \text{ cm} \quad (25)$$

$$D = d + 2H = 58,31 \text{ cm} \quad (26)$$

$$D_{real} = 0,95 * D = 55,39 \text{ cm} \quad (27)$$

$$C = \pi * D_{real} = 1,73 \text{ m} \quad (28)$$

Aplicando-se a Eq. 20 ao conjunto de dados obtidos pelos cálculos das Eq. 24 a 28, obtém-se:

$$V = 0,06 * \frac{1,73 \text{ (m)} * 4000 \text{ (RPM)}}{0,776 * 4,929} = 108 \text{ km/h} \quad (29)$$

No caso em pauta, encontrou-se um valor compatível com aquele observado no ponteiro “congelado” do velocímetro do veículo.

## 5 Discussões

A metodologia desenvolvida neste trabalho permite aferir a velocidade que o veículo desenvolvia no instante do sinistro. Entretanto, conforme discutido na seção 3, deve-se observar as hipóteses simplificadoras, tais como: as quatro rodas estarem girando com a mesma velocidade, o câmbio ser do tipo manual, ter ocorrido o “congelamento” tanto do ponteiro de velocidade quanto de rotação do motor e, por fim, o velocímetro ser de tecnologia eletrônica.

No contexto da cadeia de custódia da prova pericial, ao chegar no local dos fatos, deve o perito observar e registrar a disposição de todos os vestígios relacionados ao sinistro. Caso sejam encontradas modificações, estas devem ser registradas e seus impactos devem ser discutidos quanto ao grau de influência no resultado e na conclusão do trabalho.

Paralelamente, esse raciocínio aplica-se também aos vestígios dos ponteiros, seja pela sua movimentação, seja pela incompatibilidade entre o valor estimado e aquele observado diretamente no velocímetro.

No primeiro caso, deve-se avaliar as forças centrífugas que agiram durante o sinistro, que ao atingirem grande intensidade, como nos casos de capotamentos, podem ser capazes de alterar a posição dos ponteiros analisados, a depender da resistência que a agulha do velocímetro apresenta ao movimento.

No caso de incompatibilidade entre a estimativa do modelo e o valor observado no velocímetro, deve-se rechaçar o método. Como exemplo, cita-se o caso em que a posição da alavanca do câmbio tenha sido intencionalmente colocada em outra posição pelo condutor do veículo, antes da chegada da perícia.

Outrossim, quando for constatada a não integridade do habitáculo do painel de instrumentos, esta metodologia também não é recomendada, visto que forças externas

podem atuar sobre o conjunto de ponteiros modificando sua posição original de “congelamento”.

Um caso particular do emprego de forças externas consiste na ação de terceiros, os quais, intencionalmente, modificam a posição dos ponteiros, caracterizando a conduta tipificada como crime de inovação artificiosa, positivada pelo Artigo 312 do Código de Trânsito Brasileiro. Nesse caso, dificilmente será possível comprovar, de forma inequívoca, essa manipulação, visto que, neste caso, raramente serão encontrados vestígios relacionados ao delito.

Ainda, existem casos em que as rodas dos veículos não apresentam as mesmas medidas. Para sanar este problema, deve-se adotar, nos cálculos, as dimensões das rodas presentes no eixo que se encontra o diferencial (dianteiro ou traseiro). Quanto maior for a divergência entre as medidas geométricas dos pneumáticos instalados, maior será o erro associado ao método.

Por fim, o perito de local deve, sempre que possível, empregar mais de um método de cálculo de velocidade, de maneira crítica, avaliando as hipóteses consideradas em cada metodologia utilizada, a fim de comparar os valores obtidos por diferentes métodos. Dessa maneira, evidenciar-se-á a qualidade das hipóteses adotadas e as incertezas dos resultados obtidos.

## 6 Conclusões

A perícia em acidente de trânsito exige bastante dedicação do perito do local. É preciso atenção para o correto levantamento das variáveis da metodologia. Além disso, a experiência no levantamento do local é primordial no alcance do resultado pretendido.

Espera-se, com a metodologia proposta, um aumento das ferramentas disponíveis para estimar a velocidade das unidades móveis envolvidas nos acidentes, permitindo a elaboração de dinâmicas mais fidedignas as quais coadunem com reconstruções mais elaboradas. Com isso, é natural uma melhora técnica e em relação à qualidade dos atendimentos no que se refere às perícias de acidente de trânsito.

Para trabalhos futuros, os autores propõem o estudo da relação de marcha para veículos automáticos, assim como a modelização dos elementos de transmissão, buscando levantar os fatores que possam impactar na eficiência da variável de fluxo da qual depende o modelo, a saber, a rotação do motor, conforme discussão apresentada na seção 3 – Metodologia – relativos à interação dos componentes mecânicos ao transmitir potência através desse complexo sistema.

Por fim, vale ressaltar a importância das hipóteses de cálculo e de como a metodologia permitiu, como apresentado no estudo de caso de maneira simples, avaliar um fator primordial no evento: a velocidade no instante da colisão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TOCCHETTO, D., ESPINDULA, A. *Criminalística: procedimentos e metodologias*. Brasil: Millenium Editora (2022).
- [2] DOS REIS, E.L. Velocímetros – quando o travamento da agulha pode retratar a velocidade de colisão. *Revista Brasileira de Criminalística*, vol. 5, nº 3, novembro de 2016, p.39-48.
- [3] MARSHALL, H.P. Maximum and Problable Fuel Economy of Automobiles. *SAE Technical Paper Series, Anais...* 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International (1980).
- [4] SMITH, G.L. Commercial Vehicle Performance and Fuel Economy. *SAE Technical Paper Series, Anais...* 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International (1970).
- [5] BORUTZKY, W. Bond Graph Methodology Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models. *Springer* (2010).
- [6] FIRESTONE, F.A. A new analogy between mechanical and eletrical system elements. *Journal of the Acoustic Society of America*, 3: p. 249-267, (1933).
- [7] NICOLAZZI, L.C., ROSA, E. da, LEAL, L.C.M. *Introdução à modelagem quase-estática de automóveis*. Brasil: Publicação interna do GRANTE- Depto de Engenharia Mecânica da UFSC (2012) p. 14-15.
- [8] GILLESPIE, T.D. *Fundamentals of vehicle dynamics, revised edition*. Warrendale, USA: SAE International (2021) p. 24-25.