

ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE GUINADA DE VEÍCULOS USANDO FOTOGAMETRIA DE MARCAS DE PNEUS EM CENAS DE ACIDENTES DE TRÂNSITO

ESTIMATION OF VEHICLE YAW SPEED USING PHOTOGRAMMETRY OF TIRE TRACKS AT TRAFFIC ACCIDENT SCENES

Isaac Newton Lima da Silva**Seção de Engenharia Legal. Instituto Geral de Perícias do Rio Grande do Sul, Brasil.
Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.***Éder Fernandes***Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.***Henrique Gonzaga***Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, Brasil.*** Autor correspondente**e-mail: inls.perito@gmail.com*

Received 02 June 2024; received in revised form 06 September 2024; accepted 16 September 2024

RESUMO

Introdução: Este artigo apresenta um estudo sobre a utilização da fotogrametria para determinar o raio crítico de guinada de veículos automotores e, conseqüentemente, estimar a velocidade de derrapagem. A fotogrametria é uma técnica de medição não invasiva que utiliza imagens para reconstruir digitalmente objetos tridimensionais e analisar suas características geométricas. **Objetivo:** O estudo tem como objetivo capturar e processar imagens de marcas de pneus de um veículo em situação de derrapagem no local de um acidente de trânsito para calcular o raio crítico de guinada e determinar a velocidade de derrapagem. **Métodos:** As imagens foram retificadas por meio de software especializado e posteriormente processadas para cálculo do raio crítico de guinada, permitindo a determinação da velocidade de derrapagem com base em modelos matemáticos específicos. **Resultados:** Os resultados obtidos demonstram as previsões e a precisão da fotogrametria como uma ferramenta eficaz para análise de segurança veicular e estudos de dinâmica veicular em condições de derrapagem. **Discussão:** Esta abordagem não só fornece informações importantes para o desenvolvimento de sistemas de controle de estabilidade, mas também contribui para uma compreensão mais profunda das especificidades relacionadas à segurança veicular em situações críticas de condução. **Conclusões:** A fotogrametria revela-se um método valioso para melhorar a análise da segurança veicular e compreender a dinâmica do veículo durante incidentes de derrapagem.

Palavras-chave: *Marca de guinada; Fórmula de velocidade crítica; Retificação de imagem; Fotogrametria.*

ABSTRACT

Background: This article presents a study on the use of photogrammetry to determine the critical yaw radius of automotive vehicles and, consequently, estimate the skidding speed. Photogrammetry is a non-invasive measurement technique that uses images to digitally reconstruct three-dimensional objects and analyse their geometric characteristics. **Aim:** The study aims to capture and process images of tire tracks from a vehicle in skidding conditions at the scene of a traffic accident to calculate the critical yaw radius and determine the skid speed. **Methods:** Images were rectified using specialized software and then processed to calculate the critical yaw radius, allowing the skid speed to be determined based on specific mathematical models. **Results:** The results obtained demonstrate the predictions and accuracy of photogrammetry as an effective tool for vehicle safety analysis and vehicle dynamics studies in skidding conditions. **Discussion:** This approach not only provides important information for the development of stability control systems, but also contributes to a deeper understanding of the specificities related to vehicle safety in critical driving situations. **Conclusions:** Photogrammetry proves to be a valuable method in enhancing vehicle safety analysis and understanding vehicle dynamics during skidding incidents.

Keywords: *Yaw mark; Critical speed formula; Image rectification; Photogrammetry.*

1. INTRODUÇÃO:

Este artigo apresenta uma metodologia utilizada na reconstrução de acidentes envolvendo guinada. Um método comumente empregado para estimar a velocidade de um veículo em curva é a análise das marcas de guinada (Silva *et al.*, 2024). A guinada refere-se à orientação de um veículo, indicando que mesmo está girando em torno de seu eixo vertical, enquanto se desloca ao longo de sua trajetória (Kwasnoski, 2003). Em outras palavras, os pneus do veículo continuam a rodar, mas, ao mesmo tempo, o veículo desliza lateralmente. Em um movimento de guinada controlado, é esperado que os pneus traseiros sigam a trajetória dos pneus dianteiros correspondentes. Durante uma curva, os pneus traseiros devem ficar mais próximos do lado interior da curva em relação aos pneus dianteiros. No entanto, quando um veículo ultrapassa a "velocidade crítica", ele começa a escorregar lateralmente (Glennon, 2006). Nessa circunstância, os pneus traseiros oscilam até se afastarem mais do que os pneus dianteiros ao fazerem a curva para dentro (Johnson e Imwinkelried, 2019). A utilização de fotografias do local do evento pode auxiliar na determinação do raio crítico de guinada. A técnica, como será vista, mostra-se vantajosa em relação aos procedimentos usuais de medição indireta, via corda e flecha.

1.1. Velocidade Crítica de Guinada

A reconstrução de acidentes é uma aplicação da física baseada nos princípios da mecânica clássica desenvolvida por Sir Isaac Newton (Campbell, 1974). A Primeira Lei de Newton, também conhecida como Lei da Inércia, afirma que um objeto em movimento uniforme permanecerá nesse estado, a menos que uma força externa atue sobre ele (Struble e Struble, 2020). Quando um corpo se move ao longo de uma trajetória circular com velocidade constante, sua velocidade varia devido à mudança na direção do movimento. Essa variação na velocidade ao longo do tempo é denominada aceleração centrípeta, que possui uma direção radial em direção ao centro do movimento circular e é representada pela Equação 1:

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (\text{Eq. 1})$$

Nesta equação, 'a' representa a aceleração, 'v' representa a velocidade (em metros por segundo), e 'R' é o raio de movimento (em metros). Segundo a Segunda Lei do Movimento de Newton, a aceleração de um objeto em movimento é diretamente proporcional à força aplicada sobre ele e inversamente proporcional à sua massa. Assim, a Equação 2 é válida:

$$F = m * a \quad (\text{Eq. 2})$$

Nesta equação, F = força (N), m = massa (kg), e a = aceleração (m / s²).

Podemos agora substituir a Equação 1 por "a" na Equação 2 para derivar a Equação 3:

$$F = \frac{m*v^2}{R} \quad (\text{Eq. 3})$$

A força lateral exercida em um veículo em movimento sobre uma superfície de pavimento é gerada pela interação da força de atrito entre os pneus e a estrada da conforme a Equação 4:

$$F = \mu * m * g \quad (\text{Eq. 4})$$

Nesta expressão, μ representa a demanda de atrito entre os pneus e a estrada (fator de arrasto) e g a aceleração da gravidade (m/s²). Ao substituir a Equação 4 por μ na Equação 3, avançamos para o próximo passo na derivação. Substituir a Equação 4 por F na Equação 3 representa a Equação 5.

$$V = \sqrt{\mu * g * R} \quad (\text{Eq. 5})$$

Agora, ao considerarmos a superelevação das curvas da estrada, a equação se transforma em (Eq. 6):

$$V = \sqrt{(\mu \pm e) * g * R} \quad (\text{Eq. 6})$$

1.2. O “R” na fórmula da velocidade de guinada

A fim de aplicar a Fórmula da Velocidade Crítica, é necessário que um especialista determine o raio (R) da marca de guinada. Para encontrar esse raio, o especialista deve calcular a corda e a flecha média da marca.

O raio da marca de guinada é determinado medindo a corda "C" e a flecha média "M" na marca de guinada. O raio de uma marca de guinada é encontrado pela Equação 7:

$$R = \frac{C^2}{8 \cdot M} + \frac{M}{2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Nesta equação,

- R representa o raio da curva,
- C representa a corda, e
- M representa a flecha média.

Alternativamente, a equação para encontrar o raio de uma marca de guinada pode incluir variáveis para levar em conta o tamanho do veículo.

O objetivo deste artigo é explorar uma metodologia inovadora para a obtenção do raio crítico de guinada, utilizando técnicas de fotogrametria aplicada à análise de fotografias de marcas de pneus deixadas em cenários de acidentes. Através de uma abordagem precisa e científica, busca-se determinar o raio crítico com base na curvatura das marcas registradas, auxiliando na reconstrução de eventos de trânsito e na interpretação do comportamento dinâmico dos veículos. O estudo visa, ainda, validar a eficácia da fotogrametria como uma ferramenta forense robusta, proporcionando maior acurácia e confiabilidade nas investigações de colisões automobilísticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. Materiais

Medir o raio crítico a partir da corda e da flecha pode apresentar alguns problemas e limitações (Žuraulis, Levulyté e Sokolovskij, 2016), que são importantes considerar.

A precisão da medição da corda e da flecha pode não ser suficiente para determinar com exatidão o raio crítico, especialmente em curvas muito fechadas ou em situações com variações na superfície da pista, o que pode resultar em resultados inconsistentes na determinação do raio crítico devido à variação da flecha média ao longo da curva, especialmente em curvas não ideais ou em superfícies irregulares. Além disso, o tamanho do veículo pode influenciar a precisão da medição, levando a estimativas incorretas do raio crítico. A calibração adequada do método de medição da corda e da flecha é necessária para obter resultados confiáveis, o que pode exigir equipamentos específicos e procedimentos detalhados. Em curvas muito complexas ou com múltiplos pontos de referência na pista, as limitações na medição da corda e da flecha podem tornar o processo impraticável ou impreciso.

Portanto, é importante considerar esses problemas ao utilizar a medição da corda e da flecha para determinar o raio crítico, e pode ser necessário recorrer a métodos mais precisos e confiáveis, como o uso de equipamentos de medição apropriados ou a análise de dados de sensores embarcados no veículo.

Assim, neste trabalho nos propomos a utilizar técnica baseada em fotogrametria, em que o raio da trajetória do veículo, no momento da guinada, pode ser verificado a partir das marcas deixadas pelos pneus, capturadas em imagens obtidas por fotografias do local.

No caso em estudo, considerou-se um caminhão da marca Ford, modelo Cargo 2422 T, sem carga, portando apenas com sua massa constante em ficha técnica. A superfície asfáltica estava seca e livre de contaminações, em geral. Dessa forma, adotou-se um coeficiente de atrito próprio para os tipos de veículo e superfície da via como de 0.60 +/- 0.05 (Irueta, 1996; Fricke, 2010).

Resumo dos materiais utilizados:

1. Software: Niewtun ® Photo, versão 2024;
2. Veículo: caminhão Ford, modelo Cargo 2422 T;
3. Superfície: asfalto seco, livre de contaminação;

4. Coeficiente de atrito: 0.60 +/- 0.05;
5. Disco diagrama extraído do veículo.

2.2. Métodos

Uma vez fotografada a trajetória da guinada, três pontos precisam ser marcados sobre a mesma, para a determinação do raio de guinada. Após isso, utilizamos a Equação 8 reduzida da circunferência.

$$(x - CG.x)^2 + (y - CG.y)^2 = R^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde “CG.x” e “CG.y” são as coordenadas do centro, “x” e “y” são as coordenadas de um ponto sobre a trajetória curva, e “R” é o raio requerido.

A equação do círculo também pode ser descrita por (Eq. 9):

$$C1 * x^2 + C1 * y^2 + C2 * x + C3 * x + C4 \quad (\text{Eq. 9})$$

Depois de substituir os três pontos dados que estão no círculo, obtemos o conjunto de equações que podem ser resolvido, para obtenção dos coeficientes. O cálculo das coordenadas do Centro de Giro (CG), com base nos pontos A, B e C é mostrado a seguir:

$$CG.X = \frac{-C2}{2 * C1} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$CG.Y = \frac{-C3}{2 * C1} \quad (\text{Eq. 11})$$

2.1.1. Determinação do coeficiente de atrito

Na fórmula da velocidade crítica, o μ representa o coeficiente de atrito do veículo em relação à estrada. Para aplicar essa fórmula, é essencial que o especialista também determine o coeficiente específico para o veículo. O coeficiente de atrito representa a desaceleração dos pneus de um veículo ao deslizar sobre uma superfície.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

3.1 Resultados

O acidente em pauta, envolveu dois caminhões, dois automóveis e uma pick-up. O veículo cuja trajetória é investigada trata-se de um caminhão que, após ingressar em trajetória de guinada, saiu da pista, vindo a ter seu sítio de repouso na área marginal esquerda ao seu sentido normal de tráfego. Uma fotografia parcial do local do acidente pode ser vista na Figura 2.

3.1.1. Retificação de imagem

A retificação de imagem é o processo de correção de distorções geométricas em uma imagem para que ela represente fielmente a cena original em termos de proporções e formas. Essas distorções podem ocorrer devido a vários fatores, como a perspectiva da câmera, a inclinação do objeto fotografado ou as características ópticas do sistema de captura de imagem.

A retificação de imagem é especialmente importante em áreas como a visão computacional, cartografia, análise de imagens médicas e processamento de imagens aéreas ou de satélite. Ela pode envolver operações como correção de perspectiva, remoção de distorções de lente, alinhamento de objetos em diferentes planos e ajustes de escala.

Em resumo, a retificação de imagem busca transformar uma imagem distorcida em uma representação mais precisa e fiel da realidade, facilitando análises, medições e interpretações precisas a partir dessas imagens.

Na retificação, as coordenadas (x, y), no caso, referem-se à imagem retificada, as coordenadas correspondentes na imagem distorcida são (u, v) e a imagem retificada pode ser representada por uma fotografia aérea (Google Earth) ou um croqui em escala. Neste trabalho, consideraremos desprezíveis os desníveis e as curvaturas no terreno.

A partir de um número conhecido de pontos no terreno (>4) é possível calcular os parâmetros da transformação. Para isso, é necessário informar uma referência (distância conhecida no terreno) para se calcular a escala

das medições. As informações podem ser entradas com mouse ou teclado.

Com isso, uma imagem distorcida pode ser transformada em uma representação plana e proporcional. Neste trabalho, foram utilizados quatro pontos de referência, que são selecionados tanto na imagem distorcida quanto na imagem corrigida. Esses pontos correspondentes permitem a aplicação de transformações matemáticas, como a homografia, para ajustar a perspectiva e alinhar corretamente os elementos da imagem.

A Equação (12) fundamental para obtenção dos parâmetros da homografia é (Liebowitz e Zisserman, 1998; CHEN *et al*, 2021; Pedrini, e Schwartz, 2008):

$$\begin{matrix} x & h_{11} & h_{12} & h_{13} & u \\ y & h_{21} & h_{22} & h_{23} & v \\ 1 & h_{31} & h_{32} & h_{33} & 1 \end{matrix} \quad (\text{Eq. 12})$$

Para o cálculo da imagem retificada, recorreremos a um software Niewtun © Photo. Para identificarmos o quadrilátero a ser retificado, tomamos como referência as linhas de contenção da via, distantes 7 m uma da outra (largura da via). Para as linhas perpendiculares, verificamos que as linhas da abertura de caminhão parado no alinhamento com a via apresentavam-se paralelos, permitindo inferir que a câmera não apresentava ângulo de inclinação nulo, nessa direção. Nesse estudo, imagens aéreas estavam disponíveis, permitindo identificar as referências correspondentes em ambas as imagens (Figura 3). Tomou-se a posição do marcador e seu alinhamento com a linha de borda branca, a traseira direita de veículo envolvido no acidente e um cone de sinalização, posicionado ao centro da via. Observa-se que a trajetória apresenta um raio de giro em seu início, o qual varia suavemente, até a saída de pista do veículo. Os pontos da curva escolhidos representam melhor o início da trajetória.

Com base na imagem retificada da Figura 4, a qual media 3130 x 785 pixels, foi possível determinar as coordenadas dos pontos marcados e, através de software específico, obter as coordenadas, ainda em pixels, do centro de giro (CG). A matriz de transformação utilizada pode ser visualizada na Figura 4 superior.

A distância equivalente ao Raio Crítico foi obtida através da equação de distância entre o CG e um dos pontos de referência, utilizando a Equação 13. Nesta equação, a escala para converter de pixel para metros foi aplicada.

$$R = \sqrt{(CG.X - A.X)^2 + (CG.Y - A.Y)^2} * \text{escala} \quad (\text{Eq. 13})$$

Dessa forma, com base nos pontos A (130,512), B(353,490) e C(938,378), obtivemos um valor para o Raio Crítico (R_{crit}) de 71 m, para um centro de giro com coordenadas em pixels $CG.X=-202$, $CG.Y=-3991$.

3.1.2. Resultados da velocidade de guinada, a partir dos dados do Raio Crítico e do coeficiente de atrito

O procedimento de cálculo com o objetivo de determinar a faixa de velocidade de tráfego do veículo Ford/Cargo 2422 T, na iminência da saída da pista, utilizou a metodologia da velocidade crítica em derrapagem e de fotogrametria, para a determinação do raio crítico.

Variáveis utilizadas para a determinação da velocidade:

R_{crit} (raio da trajetória do Ford/2224T, em derrapagem): (71 m \pm 3%)

μ (coeficiente de atrito pneus / pavimento asfáltico): (0,60 \pm 0,05)

Equações utilizadas e resultados para a velocidade crítica:

$$V_{crit} = 11,3\sqrt{R_{crit} \cdot \mu} = 74 \text{ km/h} \quad (\text{Eq. 14})$$

Em que a incerteza foi estimada em:

$$\delta v_1 = \pm 4 \text{ km/h}$$

3.1.3. Confirmação dos resultados em comparação com dados do tacógrafo

Como o veículo estava equipado com equipamento cronotacógrafo, pudemos verificar

sua velocidade. Retiramos do tacógrafo do caminhão um conjunto com sete discos diagramas, abaixo analisado.

Tratava-se de um conjunto com sete discos diagramas da marca VDO, modelo 125km/h – 7 x 24 horas. No momento do evento, o disco diagrama de número 1 apresentava às 14h07min um movimento aleatório, típico de impacto, partindo de uma velocidade de aproximadamente 80 km/h, até a parada do veículo (Figura 5, seta).

Todavia, como já observado, a trajetória apresentava variação de raio de curvatura, não sendo possível, pela técnica escolhida, obter resultados com a acuracidade necessária, em trecho mais distante do equipamento de aquisição. Observa-se, também, que no caso em pauta, embora o veículo estivesse trafegando em velocidade superior à velocidade crítica, esta representa a velocidade mínima em que o mesmo trafegava, para que se observasse a derrapagem.

3.2 Discussões

A técnica de fotogrametria provou ser uma ferramenta robusta e eficaz na obtenção do raio crítico em trajetórias complexas, especialmente em contextos onde a precisão é fundamental para a análise. Durante o estudo, ficou evidente que a qualidade das imagens capturadas e a calibração adequada dos equipamentos desempenham papéis centrais na exatidão dos resultados. Imagens de alta resolução e bem ajustadas garantem a identificação clara de marcas de pneus e pontos de referência, o que contribui diretamente para a acurácia das medições.

Os softwares especializados em fotogrametria, utilizados para automatizar o processamento das imagens, reduziram significativamente a margem de erro humano, permitindo que os dados fossem interpretados de maneira mais rápida e eficiente. Isso reforça a importância dessas ferramentas tecnológicas no campo das análises forenses e na reconstrução de eventos. No entanto, um desafio observado foi a dependência da qualidade dos algoritmos de processamento. Melhorias nesses algoritmos podem levar a uma maior precisão, mesmo em imagens de menor qualidade ou em situações de iluminação desfavoráveis.

Em comparação com métodos tradicionais de medição, a fotogrametria oferece maior flexibilidade, permitindo medições em

diversos pontos da trajetória, o que pode ser vantajoso para análises detalhadas de curvas e superfícies de terrenos variados. Essa capacidade se destaca como uma das principais vantagens do método, sendo de grande relevância em estudos que envolvem diferentes condições de pista e variáveis ambientais.

3.2.1. Pesquisas Futuras:

Para o avanço da técnica de fotogrametria na obtenção do raio crítico, pesquisas futuras devem focar no desenvolvimento de novos algoritmos e metodologias de processamento de imagem, com o objetivo de aumentar a precisão e a robustez dos resultados. Outra linha de investigação interessante seria a integração de tecnologias emergentes, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, para aprimorar a automação e reduzir a dependência de dados de alta qualidade.

Estudos comparativos entre a fotogrametria e outras técnicas de medição de raio crítico, em diversas condições de terreno e com diferentes tipos de veículos, também seriam valiosos para expandir o conhecimento na área e validar ainda mais a aplicabilidade da fotogrametria em contextos variados.

Por fim, os resultados obtidos nesta pesquisa, compatíveis com registros feitos por equipamentos cronotacógrafos, incentivam o uso contínuo da fotogrametria em estudos futuros, especialmente em reconstruções forenses e investigações de acidentes.

4. CONCLUSÕES:

A técnica de fotogrametria mostrou-se eficaz na obtenção do raio crítico em trajetórias complexas, fornecendo resultados confiáveis. A precisão na determinação do raio crítico está diretamente ligada à qualidade das imagens capturadas e ao processo de calibração dos equipamentos utilizados. A utilização de imagens nítidas e de alta resolução, combinado a uma calibração precisa, é fundamental para garantir a exatidão nas medições.

O uso de softwares especializados em fotogrametria simplifica o processo de análise e cálculo, automatizando etapas cruciais e minimizando a intervenção humana, o que reduz a possibilidade de erros. Além disso, a fotogrametria se destacou ao permitir medições em diferentes pontos de uma trajetória, oferecendo uma visão mais detalhada e

abrangente dos fatores que influenciam o raio crítico em condições variáveis.

A validação dos resultados obtidos por meio da fotogrametria, seja por comparação com métodos tradicionais ou por testes de precisão, é essencial para assegurar a confiabilidade dos dados.

5. DECLARAÇÕES

5.1. Limitações do Estudo

Nenhuma limitação era conhecida no momento do estudo.

5.2. Fonte de financiamento

Esta pesquisa foi financiada pelos autores.

5.3. Conflitos de Interesse

Não há conflito de interesse a declarar.

5.4. Open Access

Este artigo está licenciado sob uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0), que permite o uso, compartilhamento, adaptação, distribuição e reprodução em qualquer meio ou formato, desde que você dê o devido crédito ao (s) autor (es) original (is) e a fonte, forneça um link para a licença Creative Commons e indique se foram feitas alterações. As imagens ou outro material de terceiros neste artigo estão incluídos na licença Creative Commons do artigo, a menos que indicado de outra forma em uma linha de crédito para o material. Se o material não estiver incluído na licença Creative Commons do artigo e seu uso pretendido não for permitido por regulamentação legal ou exceder o uso permitido, você precisará obter permissão diretamente do detentor dos direitos autorais. Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

6. REFERÊNCIAS:

1. Kwasnoski, John (2003). Crash [1] John kwasnoski, crash reconstruction basics for prosecutors: targeting hardcore impaired drivers 1, 21 (am. Prosecutors res. Inst., 2003).
2. John c. Glennon, Calculating Critical Speed - A Motor-vehicle crash Reconstruction Method Fraught with Error, crashforensics.com, (aug. 2006).
3. Elliot Johnson and Edward J. Imwinkelried. Forensics Commentary Accident Reconstruction: The Estimation of Speed Based on Yaw Mark Analysis. Criminal Law Bulletin, Vol. 55 No. 3. 2019.
4. Campbell, K., Energy Basis for Collision Severity, SAE Paper 740565, SAE International, 1974.
5. Donald E. Struble and John D. Struble. Automotive Accident Reconstruction: Practices and Principles. Second Edition. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. 2020. International Standard Book Number-13: 978-0-367-41583-9 (Hardback).
6. Vidas Žuraulis, Loreta Levulytė, Edgar Sokolovskij. Vehicle Speed Prediction from Yaw Marks Using Photogrammetry of Image of Traffic Accident Scene. Procedia Engineering Volume 134, 2016, Pages 89-94. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.043.
7. Fricke, Lynn B. Traffic Crash Reconstruction 2nd Edition, Evanston, Illinois: Northwestern University Center for Public Safety, 2010.
8. Victor A. Irureta. Accidentologia Vial y Pericia. Ediciones La Rocca. 1996.
9. Liebowitz, D. and Zisserman, A. Metric rectification for perspective images of planes. Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, CA, USA, 1998, pp. 482-488.
10. CHEN, Qiang; XU, Hong-Guo; LIU, Xiao-Feng; GUAN, Zhi-Wei. Application of Plane Homography for Vehicle Speed Calculations in Traffic Accident Investigations. Mathematical Problems in Engineering. Volume 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/8853331>
11. Pádrini, Hélio; Schwartz, William Robson. Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações. São Paulo: Thomson, 2008. xvi, 508p.
12. Gonzaga, H., Fernandes, É., & Silva, I. N. L. da. (2024, July 24). ANALYSIS OF UNCERTAINTY IN THE DETERMINATION OF THE CRITICAL YAW RADIUS USING MONTE CARLO SIMULATION. PERIÓDICO TCHÊ QUÍMICA. Dr. D. Scientific Consulting. Retrieved from

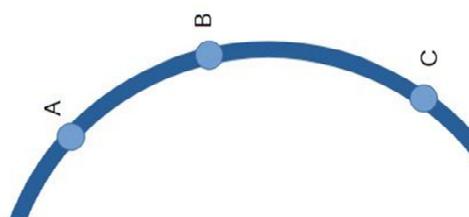


Figura 1. Marcação dos pontos A, B e C na trajetória.

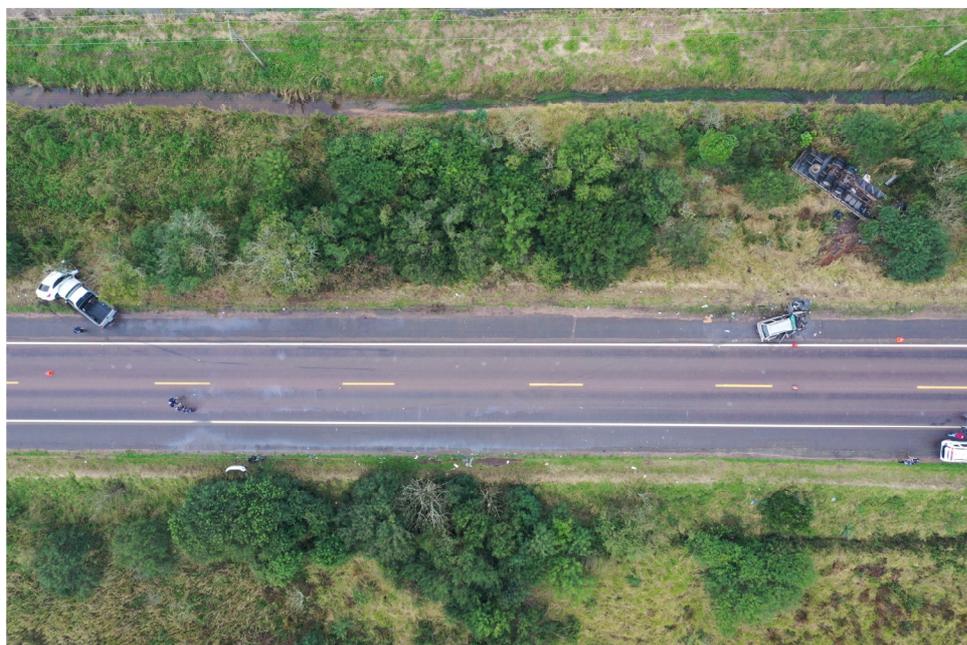


Figura 2. Local do acidente.



Figura 3. Imagem a ser retificada, com marcação de pontos da trajetória de guinada.



Figura 4. Imagem em perspectiva, inferior, e imagem retificada, superior.

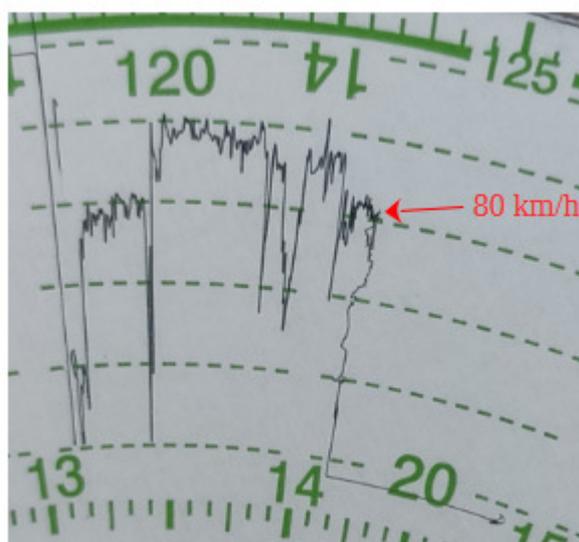


Figura 5. Disco diagrama, mostrando instante da saída de pista.