



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

ANTONIO PEREIRA ARANTES NETO

Determinação da Velocidade de Impacto a partir da Análise da Energia de Deformação Acumulada

Goiânia
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES
E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Antonio Pereira Arantes Neto

3. Título do trabalho

Determinação da Velocidade de Impacto a Partir da Análise da Energia de Deformação Acumulada

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
 - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Da Cruz Junior, Professor do Magistério Superior**, em 20/05/2025, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Pereira Arantes Neto, Discente**, em 20/05/2025, às 09:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5381836** e o código CRC **762D8E1E**.

ANTONIO PEREIRA ARANTES NETO

Determinação da Velocidade de Impacto a partir da Análise da Energia de Deformação Acumulada

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Gelson da Cruz Júnior

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Arantes Neto, Antonio Pereira

Determinação da Velocidade de Impacto a partir da Análise da Energia de Deformação Acumulada [manuscrito] / Antonio Pereira Arantes Neto. - 2025.

LXVI, 66 f.

Orientador: Prof. Dr. Gelson Cruz Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2025.

1. Reconstrução de acidentes. 2. Deformação veicular. 3. Energia de impacto. 4. Velocidade de colisão. 5. Fotogrametria. I. Cruz Júnior, Gelson, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 7 da sessão de Defesa de Dissertação de ANTONIO PEREIRA ARANTES NETO, que confere o título de Mestre em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia de Computação**.

Ao primeiro dia do mês de abril de dois mil e vinte e cinco, a partir das **15h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Determinação da Velocidade de Impacto a Partir da Análise da Energia de Deformação Acumulada**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Gelson da Cruz Junior - (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto - (EMC/UFG)** Membro Titular Interno e Professor Doutor **Tiago do Carmo Nogueira - (IFBaiano)** Membro Titular Externo; **cujas participações ocorreram através de videoconferência:** <https://meet.google.com/bzp-ybin-rjk>. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Gelson da Cruz Junior**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao primeiro dia do mês de abril de dois mil e vinte e cinco.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Da Cruz Junior, Professor do Magistério Superior**, em 01/04/2025, às 17:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tiago Do Carmo Nogueira, Usuário Externo**, em 01/04/2025, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 02/04/2025, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Pereira Arantes Neto, Docente**, em 25/04/2025, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5277761** e o código CRC **F18EA7A1**.

*Este trabalho é dedicado a todas as crianças que sonham ser cientistas, especialmente a
minha filha.*

Agradecimentos

A conclusão deste trabalho só foi possível pelas bênçãos de Deus. Manifesto os meus agradecimentos e a minha eterna gratidão a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho. Agradeço especialmente:

- à minha querida esposa Larissa, pelo apoio, amor e companheirismo em todos os momentos;
- a minha filha querida, pelo amor, e pela motivação em continuar perseverando para superar mais esta etapa da minha vida;
- ao Professor e amigo Gelson da Cruz Junior, pela orientação, compreensão, paciência e amizade, durante todas as etapas do desenvolvimento desta tese;
- aos meus pais, Lúcio e Luciana, pelos valores e ensinamentos repassados.

*"Não tenho certeza sobre os automóveis.
Com toda essa velocidade adiante
podem retroceder a civilização."
Booth Tarkie*

Resumo

A reconstrução de acidentes automobilísticos é uma disciplina essencial que possibilita compreender detalhes importantes sobre colisões, como a velocidade envolvida no momento do impacto. Este estudo tem por objetivo determinar a velocidade de colisão de veículos através da análise das deformações frontais observadas após o acidente. A metodologia adotada combina técnicas modernas, como fotogrametria para criação de modelos tridimensionais detalhados dos danos, escaneamento tridimensional utilizando sensores LiDAR, e simulações numéricas realizadas por meio da modelagem computacional por elementos finitos (FEM). Os resultados demonstraram que as velocidades estimadas apresentaram uma margem reduzida de erro, confirmando a precisão e eficácia dos métodos adotados. Destaca-se qualitativamente a robustez e confiabilidade da metodologia proposta em diferentes cenários reais de colisões, enfatizando sua importância para análises forenses e segurança automotiva. Conclui-se que o método desenvolvido representa uma ferramenta técnica confiável para auxiliar investigações periciais, possibilitando avanços significativos na segurança veicular e na compreensão científica dos fenômenos envolvidos em colisões automobilísticas.

Palavras-chave: Reconstrução de acidentes, Deformação veicular, Energia de impacto, Velocidade de colisão, Fotogrametria, LiDAR, Elementos finitos, Segurança automotiva.

Abstract

Vehicle accident reconstruction is an essential discipline aimed at understanding critical details of collisions, such as vehicle speed at the moment of impact. The primary goal of this study is to determine vehicle collision speed through the analysis of frontal deformation observed post-impact. The methodology integrates modern techniques, including photogrammetry to create detailed three-dimensional damage models, LiDAR-based 3D scanning, and numerical simulations through finite element modeling (FEM). The obtained results demonstrated reduced error margins in speed estimation, confirming the accuracy and effectiveness of the adopted methods. Qualitatively, the proposed methodology proved robust and reliable across different real-world collision scenarios, highlighting its significance in forensic analysis and automotive safety. The study concludes that the developed method represents a reliable technical tool for forensic investigations, significantly advancing automotive safety and the scientific understanding of vehicle collision phenomena.

Keywords: Accident reconstruction, Vehicle deformation, Impact energy, Collision speed, Photogrammetry, LiDAR, Finite element modeling, Automotive safety.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comportamento da velocidade $V(t)$, deslocamento $D(t)$ e aceleração $a(t)$ em função do tempo durante a colisão de um veículo com objeto fixo.	21
Figura 2 – Variáveis de impacto.	23
Figura 3 – Diagrama força-deslocamento indicando as energias dissipadas (E_D) e recuperadas (E_R) durante a deformação veicular em uma colisão.	24
Figura 4 – Método de validação cruzada	28
Figura 5 – Relação entre tamanho do objeto e acuracidade para diferentes métodos de medições sem contato.	38
Figura 6 – Fluxograma metodológico para medição da deformação e cálculo da velocidade de colisão.	39
Figura 7 – Aparelho para estabilização e luz do escaneamento.	42
Figura 8 – Vista dos veículos após colisão frontal com objeto fixo (a) V1 e (b) V2.	43
Figura 9 – Medições das deformações C_n no veículo V1.	44
Figura 10 – Medições das deformações C_n no veículo V2.	45
Figura 11 – Escaneamento 3D dos veículos utilizando o sensor LiDAR.	45
Figura 12 – Comparação de nuvens de pontos para V1 no CloudCompare.	46
Figura 13 – Sobreposição das malhas de V1 avariado e sem deformação.	47
Figura 14 – Comparação de nuvens de pontos para V2 no CloudCompare.	48
Figura 15 – Sobreposição das malhas de V2 avariado e sem deformação.	48
Figura 16 – Vista do veículo sinistrado.	50
Figura 17 – Fotogrametria de V1.	50
Figura 18 – Medição da região de deformação de V1.	51
Figura 19 – Regressão linear para calibração através do ImageJ.	52
Figura 20 – Resultados de deformação obtidos (a) na medição real e (b) no software para V1.	52
Figura 21 – Veículo 2 em análise (a) avariado e (b) sem avarias para medições reais.	54
Figura 22 – Fotogrametria de V2.	54
Figura 23 – Regressão linear para calibração através do ImageJ.	55
Figura 24 – Dispersão entre a velocidade estimada com base na energia de deformação (via Campbell) e a velocidade real estimada a partir da massa do veículo.	56
Figura 25 – Gráfico de sensibilidade da energia de deformação em função da profundidade CMÁX.	57
Figura 26 – Reconstituição do sinistro em 3D.	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre métodos de estimativa de velocidade veicular	20
Tabela 2 – Valores típicos de coeficientes de rigidez veicular (k) por categoria de veículo	22
Tabela 3 – Métodos para determinação da velocidade de impacto em acidentes . .	32
Tabela 4 – Métodos de escaneamento 3D e suas características	33
Tabela 5 – Especificações técnicas do sensor LiDAR do iPhone 13 Pro Max	41
Tabela 6 – Etapas do procedimento de medição de deformação com o ImageJ . . .	41
Tabela 7 – Tipos de Colisão e Veículos Envolvidos	43
Tabela 8 – Calibração medidas reais com medidas da imagem em análise para V1 (4032×3024 px, 8 bits)	50
Tabela 9 – Valores segmentados de deformação frontal (C1 a C6) para os veículos V1 e V2	52
Tabela 10 – Cálculos Intermediários de Energia de Deformação via Campbell	53
Tabela 11 – Calibração medidas reais com medidas da imagem em análise para V2 Porsche (1599×899 px, 8 bits)	54
Tabela 12 – Comparação da Energia de Deformação com Medidas Diferentes	56
Tabela 13 – Cálculo de Energia pelo Método de Campbell	56

Sumário

Lista de Abreviaturas e Siglas	12
1 Introdução	13
1.1 Análise cinemática do impacto	20
1.2 Análise dinâmica do impacto	21
1.3 Determinação do Coeficiente de Rigidez Veicular	22
1.4 Considerações sobre o Poste de Concreto Armado	22
1.5 Análise Velocidade Método de Campbell	23
1.6 Objetivos	25
1.6.1 Objetivos Específicos	25
1.7 Limitações	25
1.8 Hipótese	26
1.9 Resultados esperados	26
2 Materiais e métodos	27
2.1 <i>Crash-Test</i>	27
2.2 <i>Lidar</i>	27
2.3 <i>Dispositivo portátil com tecnologia Lidar X Outros Dispositivos de Captura</i>	31
2.4 <i>Fotogrametria</i>	33
2.5 ImageJ	36
2.6 A Fotogrametria no Estudo Forense	37
2.7 Metodologia	38
2.7.0.1 Critérios de validação e cálculo do erro	40
2.7.1 Procedimento de escaneamento com LiDAR	40
2.7.2 Análise de deformações por imagens com o software ImageJ	41
3 Resultados	42
3.1 Dispositivo de Captura	42
3.2 Descrição do Estudo de Caso	42
3.3 Metodologias de Medição	43
3.3.1 Medições In Loco	43
3.3.2 Escaneamento com LiDAR	45
3.3.3 Detalhamento do Método de Campbell	49
3.3.4 Análise com ImageJ	49
3.3.4.1 Estudo das Deformações de V1	49
3.3.5 Cálculo da Energia de Deformação	52

3.3.5.1	Estudo das Deformações e Velocidade de Colisão de V2 . . .	53
3.4	Resultados e Comparações	55
3.5	Outras Aplicações Importantes	57
4	Discussão	58
4.1	Comparação com Estudos Similares	58
4.2	Limitações nas Medições	58
5	Conclusões	60
5.1	Trabalhos Futuros	61
	Referências	62

Lista de Abreviaturas e Siglas

CRASH3 Computer Reconstruction of Automobile Speeds (programa CRASH3).

EBS Velocidade de Barreira Equivalente (*Equivalent Barrier Speed*).

EES Velocidade Equivalente de Energia (*Energy Equivalent Speed*).

FEM Finite Element Modeling (modelagem por elementos finitos).

GCP Ground Control Point (ponto de controle terrestre).

LiDAR Light Detection And Ranging (detecção por luz e alcance).

M3C2 Multi-Scale Model to Model Cloud Comparison.

SfM–MVS Structure from Motion – Multi-View Stereo.

TLS Terrestrial Laser Scanning (varredura a laser terrestre).

ToF Time-of-Flight (tempo de voo).

TTC Time-to-Collision (tempo até a colisão).

CAPÍTULO 1

Introdução

Este estudo aborda um tema de relevância crescente no campo da engenharia forense e segurança: o cálculo da velocidade veicular em impactos com objetos fixos através de medições em sua deformação. No Brasil, colisões com objetos fixos representaram 12,4% dos acidentes fatais em 2023, segundo dados do Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul ([DETRAN-RS, 2023](#)). Além disso, os acidentes de trânsito geram um custo estimado superior a R\$ 50 bilhões anuais, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), refletindo diretamente nos sistemas de saúde, previdência e produtividade nacional ([Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada \(IPEA\); Associação Nacional de Transportes Públicos \(ANTP\), 2020](#)). Dados da Polícia Rodoviária Federal (PRF) indicam que, somente em 2024, foram registrados mais de 73 mil sinistros em rodovias federais, com 6.160 vítimas fatais, representando um aumento de 9,5% em relação ao ano anterior ([PEDUZZI, 2025](#)). Tais números evidenciam a gravidade e a persistência do problema, ressaltando a importância de desenvolver metodologias eficazes e acessíveis para a reconstituição de acidentes, especialmente em cenários de difícil acesso técnico.

A análise de acidentes veiculares, especialmente aqueles envolvendo colisões com objetos fixos, é complexa e multifacetada. A implementação de tecnologias acessíveis e precisas pode não apenas aprimorar a qualidade das perícias técnicas, mas também reduzir o tempo e os custos associados aos processos judiciais decorrentes de acidentes de trânsito, contribuindo para uma maior eficiência no sistema judiciário e para a segurança viária. A velocidade do veículo no momento do impacto é um parâmetro fundamental nesta análise, influenciando diretamente na severidade dos danos causados tanto aos ocupantes do veículo quanto à infraestrutura urbana.

Tradicionalmente, a determinação dessa velocidade tem se baseado em uma variedade de métodos, incluindo testemunhos, análises de vídeo e estudos de marcas de frenagem. No entanto, esses métodos possuem limitações e podem não ser aplicáveis em todos os cenários de acidente. Dentre os métodos empíricos clássicos, destacam-se os modelos de Campbell e o [Computer Reconstruction of Automobile Speeds \(programa CRASH3\) \(CRASH3\)](#), que utilizam dados de deformação veicular para estimar a velocidade de impacto. Métodos modernos, como a fotogrametria e o uso de sensores [Light Detection And Ranging \(detecção por luz e alcance\) \(LiDAR\)](#), têm sido explorados para melhorar a precisão das análises ([CAMPBELL, 1974](#); [POPA](#); [BELES, 2013](#)).

Alguns estudos são realizados com o intuito de buscar maior segurança no veículo. Entretanto, observa-se uma lacuna significativa na validação de tecnologias portáteis, como sensores LiDAR integrados a smartphones, em cenários reais de acidentes. A maioria das pesquisas concentra-se em ambientes controlados, carecendo de estudos que comprovem a eficácia dessas ferramentas em condições reais de campo. Além disso, há uma carência notável de métodos acessíveis e portáteis que permitam a realização de perícias técnicas em locais remotos, onde o transporte de equipamentos de grande porte ou a presença contínua de peritos qualificados é limitada. A democratização dessas tecnologias pode ser crucial para ampliar a cobertura e a equidade das análises forenses no território nacional.

No estudo desenvolvido por [Jiménez, Naranjo e García \(2013\)](#), apresentam um método aprimorado para calcular o Tempo até a Colisão [Time-to-Collision \(tempo até a colisão\) \(TTC\)](#) de dois veículos. Este método visa melhorar a segurança do veículo, proporcionando informações mais precisas para sistemas de prevenção de colisão. O algoritmo proposto considera a geometria dos veículos e diferentes configurações de acidentes, oferecendo resultados mais realistas em comparação com métodos simplificados anteriores. O artigo também discute a implementação do algoritmo em sistemas de prevenção de colisão e destaca a importância de tecnologias avançadas para a redução de acidentes de trânsito.

Para compreender os efeitos biomecânicos de colisões, [Berg et al. \(1998\)](#) destacaram a importância do delta-v e da método de velocidade equivalente de energia [Velocidade Equivalente de Energia \(Energy Equivalent Speed\) \(EES\)](#) como ferramentas para avaliar a severidade dos acidentes. O artigo discute como a EES e o delta-v são ferramentas técnicas para descrever a gravidade de um acidente de veículo e como esses termos são frequentemente mal interpretados na área biomédica e médica. O estudo enfatiza a necessidade de uma compreensão interdisciplinar e colaboração entre especialistas médicos e técnicos para uma avaliação abrangente da gravidade de um acidente.

Para que seja determinado a velocidade de colisão de um veículo antes de seu impacto alguns métodos empíricos iniciais foram desenvolvidos. O autor [Campbell \(1974\)](#) foi um dos pioneiros na análise de velocidade por meio de deformações ocorridas após colisões,

apresentou uma técnica objetiva para estimar a severidade de colisões de automóveis. A técnica utiliza a danificação do veículo e as características de força-deflexão para estimar a energia absorvida na deformação plástica do veículo. Esta energia é então expressa como uma "velocidade de barreira equivalente" *Velocidade de Barreira Equivalente (Equivalent Barrier Speed) (EBS)*. O desenvolvimento é principalmente aplicável a danos frontais, mas a técnica é geral e pode ser estendida para danos laterais e traseiros. Dados são apresentados para relacionar a deformação residual e a velocidade de impacto em testes de barreira frontal para fornecer a base para um modelo simples das características de força-deflexão da estrutura frontal do veículo.

Um método para determinar a velocidade dos veículos antes da colisão foi desenvolvido por [Kubiak et al. \(2013\)](#), com base em dados de aceleração e lesões de motoristas e passageiros analisados durante o acidente. O objetivo principal deste estudo é encontrar uma correlação precisa entre a velocidade dos veículos na fase inicial da colisão e a quantidade de energia responsável pela ocorrência de deformação. Especificamente, busca-se validar a estimativa da energia de deformação obtida por meio de sensores LiDAR portáteis, com uma margem de erro inferior a 5% em comparação com as medições tradicionais. A aplicação do método de velocidade equivalente de energia (EES) para estimativa do tamanho da destruição resultou em resultados mais confiáveis em comparação com as abordagens padrão comumente usadas.

Uma metodologia essencial para o estudo da reconstrução de acidentes de trânsito é a utilização de metodologias que permitam uma avaliação objetiva da severidade dos acidentes. Como tal, os estudos de [Breitlauch et al.](#) apresentam uma nova metodologia que converte a deformação pós-colisão de veículos em energia equivalente de velocidade *EES ("energy equivalent speed")* propõem uma medida objetiva de severidade do acidente. Assim, essa abordagem ao problema é altamente eficaz e promissora para a compreensão precisa dos acidentes e da possibilidade de comparar-se adequadamente os diferentes casos de colisões ([BREITLAUCH et al., 2023](#)).

No Brasil um dos autores que realizaram estudos nesta área foi [Jr. \(2012\)](#), que abordou o fenômeno de colisões de automóveis em postes de concreto armado, destacando a necessidade de estudos nessa área devido à prevalência desses acidentes, especialmente no Rio Grande do Sul. O trabalho visa compreender os fenômenos físicos envolvidos nesses acidentes e desenvolver uma metodologia de cálculo de velocidade pré-impacto para o automóvel. O autor baseia-se em dados observados e medidos em locais de acidentes e em metodologias aplicadas em colisões descritas na bibliografia.

Outro técnica para cálculo é a de momentum de dano, envolvendo a interpretação de perfis de dano, compreensão da origem dos coeficientes de rigidez e derivação de Δv . A técnica para estimar a energia dissipada durante a deformação com base em medições de esmagamento residual é explicada. Um teste de colisão encenado é usado como exemplo

para validar a técnica. Além disso, é dada uma discussão sobre o coeficiente de restituição com a derivação de sua relação com a energia de esmagamento (DAILY; STRICKLAND; DAILY, 2006).

A luz de técnica moderna de análise, Popa e Beles (2013) propõem um novo método, o *laser profilometer*, para determinar a magnitude das deformações em veículos. Este método se destaca pela simplicidade, precisão e portabilidade do equipamento. A técnica é validada através de comparações com o método *PhotoModeler*, apresentando resultados coerentes e precisos. O artigo detalha o procedimento de medição e discute as vantagens, desvantagens e possíveis melhorias do método.

O coeficiente de rigidez da NHTSA, utilizado por Kubiak et al. (2014) aborda a determinação da energia de deformação. O artigo explora os problemas enfrentados pelos avaliadores ao determinar a velocidade de um carro imediatamente antes de um acidente com base apenas na colisão do carro com um obstáculo. Diferentes modelos e métodos, como o modelo Campbell e o método CRASH3, são discutidos para analisar deformações e estimar a velocidade de colisão.

Alguns métodos experimentais foram propostos, como o de Leibowitz (2014) que propõe uma metodologia experimental para calcular a energia de colisão de veículos motorizados com base em dados detalhados de deformação e valores de rigidez estrutural. A metodologia utiliza dados 3D para descrever precisamente as deformações ocorridas durante uma colisão, comparando-as com dados de veículos não deformados. A energia de deformação medida por meio de sensores LiDAR integrados a dispositivos móveis, associada ao uso do software ImageJ, apresenta forte correlação com a velocidade real de impacto em colisões frontais simuladas. A pesquisa inicial valida a abordagem usando modelos de elementos finitos do Centro Nacional de Análise de Colisões da George Washington University. Embora os resultados preliminares sejam promissores, são necessários desenvolvimento e análise adicionais antes que a metodologia possa ser amplamente adotada.

Alguns algoritmos foram desenvolvidos com o intuito de aprimorar os cálculos para esses eventos, sendo que o autor McHenry (2001) discutiu os algoritmos do programa CRASH3, um programa de reconstrução de acidentes de automóveis. CRASH3, que significa Computer Reconstruction of Automobile Speeds on the Highway, permite a entrada de propriedades do veículo, posições de impacto e repouso, e medições de danos para produzir aproximações de velocidades de veículos no impacto. O artigo detalha as suposições, entradas recomendadas e algoritmos de trajetória e análise de danos do programa, fornecendo insights sobre a aplicação prática e limitações do CRASH3 na reconstrução de acidentes de veículos.

Outros algoritmos surgiram, para realização de outras formas de colisões, como os dos autores Munyazikwiye, Karimi e Robbersmyr (2017), que desenvolveram um modelo matemático para simular colisões frontais entre veículos. Utilizando dados experimentais

da National Highway Traffic Safety Administration¹ (NHTSA) e um algoritmo genético, o modelo foi otimizado para representar com precisão os resultados cinemáticos reais de testes de colisão. O modelo proposto pode ajudar fabricantes de automóveis a reduzir custos associados a testes de colisão físicos, que são geralmente caros e demorados, permitindo simulações mais eficientes e precisas.

Uma nova metodologia para cálculo da velocidade em colisões traseiras foi proposta por Cao, Ye e Han (2021), combinando a equação de momento com simulações por elementos finitos. Essa abordagem visa aumentar a eficiência na determinação da velocidade de colisão e oferecer suporte técnico à identificação de responsabilidades em acidentes. Foi construído um modelo de simulação de elementos finitos e realizados múltiplos experimentos de simulação de colisão para estudar o método de cálculo de deformação de colisão. O método proposto foi comparado com software de simulação para análises de reconstrução em casos de colisão reais, mostrando boa concordância.

No campo de elementos finitos, Chen, Tang e Zhang (2016) conduziram um estudo sobre o impacto entre carros e postes de concreto circulares. O estudo, realizado através de simulações de elementos finitos, visava entender a resposta dinâmica e a mecânica de fratura dos postes de concreto durante colisões de veículos. Os resultados indicam que o grau de dano e o ponto de ruptura do poste variam com diferentes velocidades de impacto. As conclusões deste estudo fornecem referências úteis para o design de carros e a resistência de postes de concreto em cargas de impacto.

A relação entre energia cinética e severidade da colisão em acidentes veiculares foi analisada por Khata, Anthony e Fundi (2019), com foco na deformação resultante durante a reconstrução de acidentes. O estudo utilizou princípios fundamentais da física para avaliar a energia de impacto em colisões frontais completas, aplicando simulações no software Virtual CRASH® v4.0² em diversos cenários. Os resultados evidenciam a importância de monitorar as velocidades dos veículos, levando em consideração o fator energia de impacto em função do peso monitorado.

Uma abordagem inovadora para análises energéticas de acidentes envolvendo elementos fixos foi desenvolvida por Morales et al. (2017), utilizando a fotogrametria de curto alcance como principal ferramenta metodológica. A técnica proposta está diretamente associada à qualidade dos modelos fotogramétricos 3D e possibilita análises precisas por meio do software CRASHMAP, já validado e utilizado pela Polícia Local de Salamanca, na Espanha. O estudo destaca sua aplicação em colisões contra pequenos elementos rígidos e apresenta avanços significativos nas etapas de extração de características e orientação no processamento fotogramétrico.

¹ National Highway Traffic Safety Administration: agência dos EUA responsável por regulamentar e testar a segurança veicular, <https://www.nhtsa.gov>.

² Virtual CRASH® v4.0: ferramenta de reconstrução de acidentes, <https://www.artiste.com/virtual-crash>.

A avaliação da incerteza no cálculo da variação de velocidade e da energia de deformação em colisões frontais foi conduzida por [Brach, Brach e Louderback \(2012\)](#), com base no algoritmo de dano CRASH3. O estudo concentrou-se nas variações dos coeficientes de rigidez de deformação e nas medições de deformação residual, utilizando dados de testes realizados pela NHTSA em diferentes modelos de veículos. Os resultados destacam como essas incertezas podem influenciar diretamente a precisão na reconstrução da velocidade dos veículos envolvidos em acidentes.

O estudo de colisões veiculares, é desenvolvido de forma empírica. E para o aprimoramento do algoritmo, os autores ([WILLKE; MONK, 1987](#)) focaram na derivação de novos parâmetros de rigidez lateral a partir de testes de colisão. O modelo CRASH3 é utilizado para reconstruir acidentes de trânsito, utilizando evidências físicas, parâmetros do veículo e medições de danos. Os autores realizaram onze testes de colisão lateral para derivar novos parâmetros de rigidez lateral. Quatro modelos de veículos foram testados em diferentes velocidades e condições de impacto para explorar a sensibilidade dos parâmetros derivados.

A técnica também foi aplicada em redes neurais artificiais, pelos autores [Xanthopulo e Martins \(2001\)](#) que propuseram um estudo metodológico na avaliação e classificação de deformações em carros acidentados. O estudo visa desenvolver um procedimento que computa desvios de colunas de carros em relação ao padrão para inferir o estado de recuperabilidade do carro. Os autores demonstram que as redes neurais são uma técnica promissora para lidar com situações similares, oferecendo precisão e economia no processo de monitoramento.

O autor [Wach \(2014\)](#) caracterizou o método de Monte Carlo (MCM) do ponto de vista da reconstrução de acidentes de trânsito. Este método envolve cálculos repetidos usando o mesmo modelo matemático determinístico, mas selecionando valores de parâmetros específicos de forma pseudo-aleatória dentro de intervalos de incerteza predefinidos. Os resultados de cálculo são apresentados como uma função de densidade de probabilidade, facilitando a interpretação estatística dos dados e a análise da incerteza. O estudo realiza cálculo de velocidades pré-impacto, apresenta localização do ponto de colisão na estrada e análise cinemática de acidentes envolvendo pedestres.

Durante o estudo de colisão, é importante considerar sobre a influência da absorção de energia específica na velocidade do veículo e a relação entre a deformação do poste e a velocidade do veículo. Em 2022, os autores [Alardhi et al. \(2022\)](#) investigaram o impacto de colisões de veículos em postes de rua, avaliando quais tipos de impacto—frontal ou lateral—contribuem para mais danos tanto no carro quanto no poste. Utilizando o software Abaqus/Explicit, simulações numéricas foram realizadas em três diferentes velocidades para extrair relações como modelos de energia e forças de impacto. Os materiais dos postes

eram alumínio Al-6061³ e aço ASTM A36 e aço ASTM A36⁴.

A relação entre informações de segurança veicular e o comportamento do consumidor no Brasil foi analisada por [Domingues \(2016\)](#), com base nos resultados dos testes do Latin NCAP. O autor utilizou um modelo logit aninhado para estimar o impacto das classificações de zero a cinco estrelas nos níveis de utilidade percebida pelos consumidores. Os resultados revelam que veículos com melhor avaliação tendem a ser mais valorizados, enquanto os modelos com nota zero apresentaram preços significativamente mais baixos, evidenciando a influência direta da percepção de segurança na decisão de compra.

Um ponto importante neste estudo, são os resultados que podem ser obtidos no campo judicial, como estudado por [Aleksandrowicz \(2020\)](#), que explorou a modelagem de colisões frontais e a identificação de parâmetros de colisão. O artigo destaca a importância da simulação confiável para resolver disputas judiciais e suas consequências legais. Foi realizada uma simulação de impacto usando dados padrão do programa e, em seguida, parâmetros de impacto foram identificados a partir de um teste de colisão. O artigo sugere melhorias no programa V-SIM4 usado no estudo e propõe o desenvolvimento de modelos de colisão em programas de Sistema de Corpos Múltiplos (MBS) para considerar a rigidez variável do espaço corporal 3D.

Um documento técnico voltado à investigação de colisões no trânsito foi elaborado por [Royal Society e Royal Society of Edinburgh \(2022\)](#), em parceria com o Colégio Judicial, o Instituto Judicial e o Conselho de Estudos Judiciais da Irlanda do Norte. O material tem como finalidade oferecer subsídios técnicos ao sistema de justiça e aos profissionais da área jurídica, contribuindo para a correta compreensão das práticas de coleta e análise de evidências em acidentes viários. São abordados temas como dinâmica de colisões, interação com pedestres, uso de ferramentas computacionais para reconstituição de acidentes, além de princípios da mecânica clássica, características das rodovias, comportamento dos condutores e aspectos relacionados aos materiais envolvidos.

³ Liga de alumínio 6061, comum em estruturas por sua leveza e resistência à corrosão.

⁴ Aço carbono ASTM A36, norma padrão para chapas estruturais com limite de escoamento de 250 MPa

Tabela 1 – Comparativo entre métodos de estimativa de velocidade veicular

Método	Vantagens	Limitações	Aplicabilidade
Campbell (1974)	Método consagrado, simples e de baixo custo; baseia-se em dados de deformação real.	Exige medição precisa das deformações; menor acurácia em colisões complexas.	Perícias tradicionais, colisões frontais com danos visíveis e acesso direto ao veículo.
Elementos Finitos Finite Element Modeling (modelagem por elementos finitos) (FEM)	Alta precisão e capacidade de simulação de diferentes cenários; permite análises detalhadas.	Requer alto poder computacional e conhecimento técnico especializado; tempo de processamento elevado.	Estudos acadêmicos, validações laboratoriais e testes controlados de engenharia veicular.
LiDAR Portátil	Coleta tridimensional rápida; alta precisão; portátil e acessível para uso em campo.	Sensível a condições ambientais como luz intensa ou reflexos; ainda pouco validado em acidentes reais.	Perícias em campo, especialmente em locais remotos ou com infraestrutura limitada.

1.1 Análise cinemática do impacto

A Figura 1 apresenta a variação temporal de três grandezas fundamentais no estudo das colisões veiculares: a velocidade $V(t)$, o deslocamento $D(t)$ e a aceleração $a(t)$. Observa-se que a velocidade decresce ao longo do tempo, enquanto o deslocamento tende a um valor máximo $D_{\text{máx}}$, antes de reduzir em função do comportamento oscilatório do sistema. A aceleração, por sua vez, exibe flutuações representativas das forças impulsivas e resistivas durante o processo de deformação, sendo uma variável-chave na análise dos esforços internos e na estimativa da severidade da colisão. Este comportamento é típico de colisões contra objetos fixos, nas quais ocorre absorção progressiva de energia até a paralisação completa do veículo.

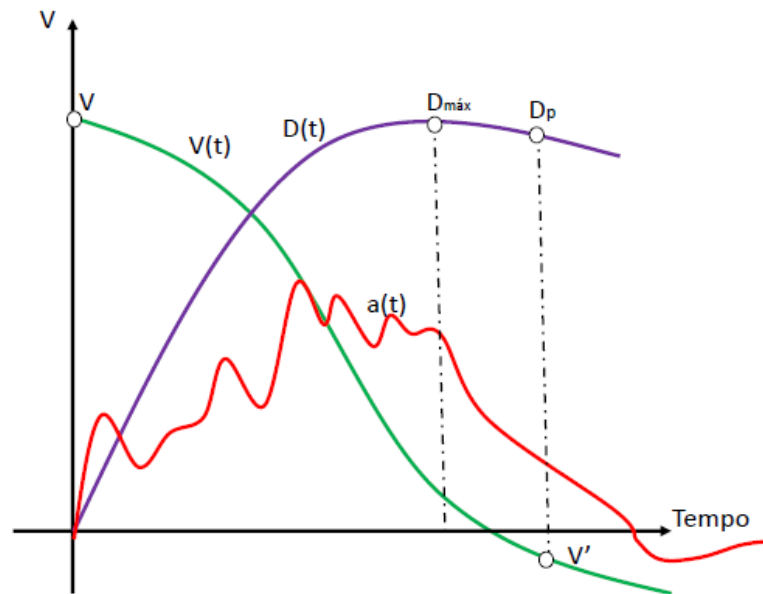


Figura 1 – Comportamento da velocidade $V(t)$, deslocamento $D(t)$ e aceleração $a(t)$ em função do tempo durante a colisão de um veículo com objeto fixo.

1.2 Análise dinâmica do impacto

A análise da colisão considera a conservação da energia mecânica, onde a energia cinética do veículo antes do impacto é parcialmente convertida em energia de deformação. A equação fundamental é:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Onde:

- E_k : Energia cinética do veículo antes do impacto (Joules)
- m : Massa do veículo (kg)
- v : Velocidade do veículo antes do impacto (m/s)

A energia de deformação (E_d) absorvida durante a colisão pode ser expressa como:

$$E_d = \frac{1}{2}kc^2 \quad (1.2)$$

Onde:

- k : Coeficiente de rigidez veicular (N/m)

- c : Profundidade da deformação (m)

Assumindo que toda a energia cinética é convertida em energia de deformação (colisão totalmente inelástica), temos:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kc^2 \quad (1.3)$$

Isolando a velocidade v , obtemos:

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot c \quad (1.4)$$

1.3 Determinação do Coeficiente de Rigidez Veicular

O coeficiente de rigidez veicular (k) pode ser obtido a partir de dados experimentais ou tabelas fornecidas por órgãos como o NHTSA. Segundo [Kubiak et al. \(2014\)](#), os valores de k variam conforme o modelo e a estrutura do veículo. Para veículos de passeio, valores típicos de k situam-se entre 1.000.000 N/m e 2.000.000 N/m.

Os valores típicos de coeficientes de rigidez veicular variam conforme o tipo e estrutura do veículo. Com base em estudos como os de [Kubiak et al. \(2014\)](#), [Jr. \(2012\)](#) e [Daily, Strickland e Daily \(2006\)](#), a Tabela 2 apresenta uma estimativa aproximada desses valores por categoria veicular.

Tabela 2 – Valores típicos de coeficientes de rigidez veicular (k) por categoria de veículo

Categoria de Veículo	Intervalo típico de k (N/m)
Veículos compactos	$0,9 \times 10^6$ a $1,5 \times 10^6$
Sedans médios	$1,2 \times 10^6$ a $2,0 \times 10^6$
SUVs/picapes	$1,8 \times 10^6$ a $3,0 \times 10^6$

1.4 Considerações sobre o Poste de Concreto Armado

A deformação do poste também contribui para a dissipação de energia. Conforme ([JR., 2012](#)), os postes apresentam diferentes fases de colapso, influenciando na quantidade de energia absorvida. A energia total de deformação (E_{total}) é a soma das energias absorvidas pelo veículo (E_v) e pelo poste (E_p):

$$E_{total} = E_v + E_p \quad (1.5)$$

A determinação de E_p requer análise específica da estrutura do poste, considerando fatores como tipo de concreto, armaduras e geometria.

1.5 Análise Velocidade Método de Campbell

O método de Campbell realiza a Análise da velocidade de impacto por meio das Variáveis de deformação no veículo (CAMPBELL, 1974; DAILY; STRICKLAND; DAILY, 2006; JR., 2012). As colisões laterais e frontais de automóveis em objetos fixos, como postes por exemplo, dependem de algumas variáveis, que estão apresentadas a seguir e descritas graficamente na Figura 2.

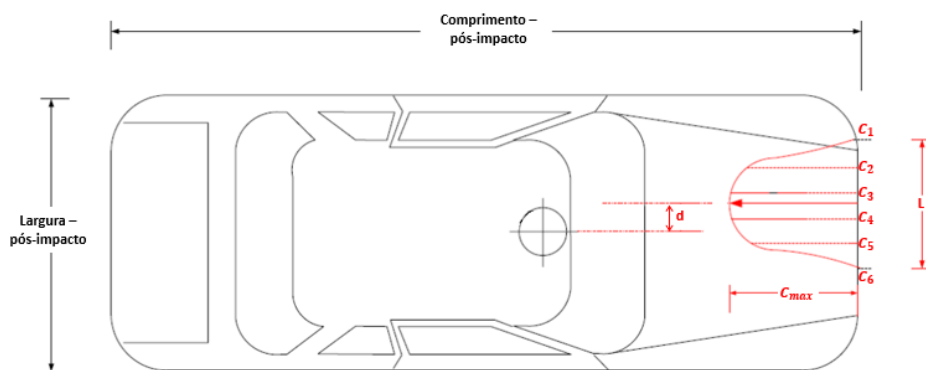


Figura 2 – Variáveis de impacto.

Uma evento de colisão é definido por períodos, sendo o primeiro o Período de pré impacto. Considerando-se o posicionamento dinâmico do veículo antes de sair lateralmente a pista, era possível que houvesse marcas de frenagem, indicando a tentativa de desaceleração do veículo, que poderiam ser utilizadas para a realização de cálculo de velocidade, porém não foram identificadas estas marcas.

O Período de impacto, é analisado utilizando do Princípio do Trabalho e Energia, a partir da determinação do deslocamento do centro de gravidade do automóvel desde o início da colisão com o poste até a sua parada, relacionando o trabalho realizado pelas forças de atrito entre as rodas do veículo e o pavimento a energia cinética equivalente (CAMPBELL, 1974; DAILY; STRICKLAND; DAILY, 2006; KUBIAK et al., 2014). Um cuidado especial deverá ser tomado na verificação do fato de observar se houve arrasto das rodas ou rolamento destas.

O método escolhido para compreensão deste evento, foi o do Método de Campbell, que pode ser usado em colisões laterais e frontais. As equações estabelecem relações entre a velocidade de impacto de um automóvel e os valores de deformação (C_n) da região colidida do veículo. Conforme equação 1, a fórmula para cálculo da energia de esmagamento, é relacionada pelas áreas de danos, e coeficientes já pré-definidos (CAMPBELL, 1974; KUBIAK et al., 2014; JR., 2012).

O Período de pós impacto, é utilizado o Princípio do Trabalho e Energia, a partir da determinação do deslocamento do centro de gravidade do automóvel desde o início da

colisão a sua completa anulação de velocidade, relacionando o trabalho realizado pelas forças de atrito entre as rodas do veículo e o pavimento a energia cinética equivalente. Analisando se houve movimento após colisão (CAMPBELL, 1974; DAILY; STRICKLAND; DAILY, 2006).

A Figura 3 representa a relação entre força e deslocamento durante uma colisão veicular, destacando a evolução das energias envolvidas no processo. A curva em preto mostra a força real de deformação, enquanto a curva azul representa um modelo teórico de rigidez progressiva. As áreas coloridas (P_1 e P_2) correspondem às energias associadas à deformação inicial e à recuperação parcial. As variáveis D_p (deformação plástica) e $D_{máx}$ (deformação máxima) indicam os limites do deslocamento. Já E_D representa a energia dissipada e E_R a energia total associada ao evento de colisão. Esta análise é essencial para estimar a energia total absorvida pelo veículo, contribuindo diretamente na reconstrução da velocidade de impacto com base em parâmetros de rigidez estrutural.

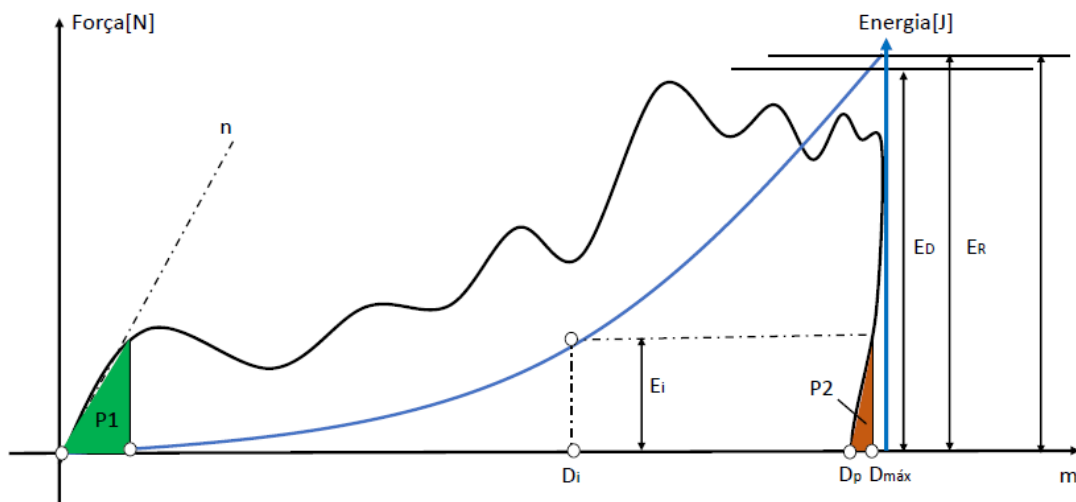


Figura 3 – Diagrama força-deslocamento indicando as energias dissipadas (E_D) e recuperadas (E_R) durante a deformação veicular em uma colisão.

A interpretação das áreas destacadas no diagrama força-deslocamento é crucial para a correta avaliação da severidade da colisão. A energia dissipada (E_D) representa a parcela da energia cinética que foi absorvida de forma irreversível na deformação plástica da estrutura veicular, contribuindo diretamente para a segurança dos ocupantes. Já a energia recuperada (E_R) está associada à recuperação elástica parcial da estrutura, sendo geralmente muito menor em colisões severas. A correta quantificação de E_D permite estimar com maior precisão a velocidade de impacto, especialmente quando combinada com parâmetros calibrados de rigidez estrutural. Essa distinção também é fundamental para aplicações biomédicas, pois correlaciona-se diretamente com o risco de lesões dos ocupantes.

1.6 Objetivos

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver e validar uma metodologia de estimativa de velocidade de impacto veicular baseada em medições de deformações obtidas por sensores LiDAR portáteis, visando ampliar a acessibilidade e a precisão das análises periciais, especialmente em locais com restrições logísticas.

1.6.1 Objetivos Específicos

- Analisar os principais métodos de estimativa de velocidade veicular com base em deformações estruturais, identificando suas limitações e potencial de aplicação prática.
- Implementar a coleta de dados tridimensionais por meio de sensores LiDAR portáteis, acoplados a dispositivos móveis, e calibrar a análise utilizando o software ImageJ.
- Comparar os resultados obtidos com os métodos tradicionais (Campbell, CRASH3) e simulações computacionais (elementos finitos), avaliando a acurácia dos diferentes modelos.
- Aplicar a metodologia desenvolvida em estudos de caso reais, avaliando sua viabilidade prática e replicabilidade em ambientes externos não controlados.

1.7 Limitações

As limitações se relacionam a restrição do escopo da pesquisa, tendo em vista que diversos modelos surgem na área de cálculo de velocidade por deformações. Os critérios adotados para esta restrição são:

- Variação de Materiais: Diferentes veículos podem ter diferentes materiais e designs, o que pode afetar a deformação e, conseqüentemente, a estimativa da velocidade.
- Complexidade da Colisão: Acidentes envolvendo múltiplos veículos ou obstáculos podem complicar a análise.
- Dados Incompletos: Em alguns casos, pode não haver dados suficientes para fazer uma reconstrução precisa.
- Presença de Fatores Externos: Condições do ambiente, como chuva, podem influenciar o resultado da colisão e a subseqüente deformação.

1.8 Hipótese

A hipótese central deste estudo é que a energia de deformação obtida por meio de sensores LiDAR portáteis, em conjunto com o processamento no software ImageJ, apresenta correlação estatisticamente significativa com a velocidade real de impacto em colisões frontais com objetos fixos. Supõe-se que essa abordagem possibilite estimativas com margem de erro inferior a 5% em relação às medições tradicionais, validando seu uso em ambientes reais.

1.9 Resultados esperados

- Estimativas Precisas: Obter uma estimativa confiável e precisa da velocidade do veículo no momento da colisão.
- Modelos 3D de Danos: Usar a fotogrametria para criar modelos tridimensionais detalhados do dano sofrido pelo veículo.
- Melhoria na Segurança Automotiva: Utilizar os insights adquiridos para contribuir com melhorias no design e segurança dos veículos.
- Auxílio em Investigações Forenses: Fornecer evidências e dados robustos para ajudar em investigações relacionadas a acidentes de trânsito.

CAPÍTULO 2

Materiais e métodos

Neste capítulo, apresentaremos os métodos clássicos existentes mais utilizados para o cálculo de velocidade em sinistros veiculares.

2.1 *Crash-Test*

Para a realização de testes de segurança em veículos comercializados, entidades especializadas avaliam a segurança dos carros em colisões frontais e laterais, usando velocidades padronizadas e especificadas. O primeiro crash test (Teste de Colisão), conduzido em 1934 pela General Motors, foi uma iniciativa independente da montadora.

No Brasil os testes são estudados e analisados pela Latin NCAP, esta realiza o crash tests dos veículos aqui comercializados em situações de colisão frontal a velocidade de 64 km/h e lateral a 50 km/h. Dados estes que são utilizados no método de deformação proposto por Campbell como entrada para os valores de velocidade de teste ([DOMINGUES, 2016](#)).

2.2 *Lidar*

O sensor Lidar (Detecção e Medição por Luz) utiliza um feixe de luz laser para medir a distância e a posição de objetos no ambiente circundante. A técnica envolvida é chamada de "escaneamento a laser" ou "varredura a laser". O princípio físico subjacente é o tempo de voo, que mede o tempo que a luz leva para viajar do sensor até o objeto e retornar.

O sensor Lidar emite pulsos de luz laser em direção aos objetos circundantes Figura 4 e mede o tempo que leva para o pulso retornar ao sensor. A partir dessa informação, o sensor pode calcular a distância entre o objeto e o sensor. Os sensores Lidar também usam um scanner giratório para criar um mapa tridimensional do ambiente, coletando pontos de dados de várias direções.

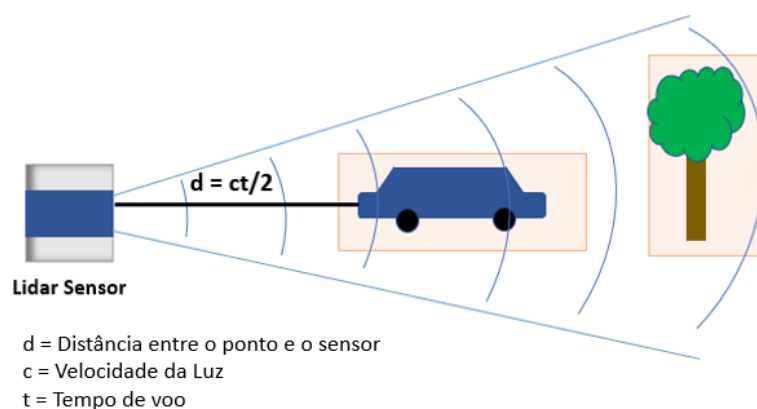


Figura 4 – Método de validação cruzada

Os princípios físicos que regem o funcionamento do Lidar incluem a velocidade da luz, a reflexão da luz pelos objetos e a detecção do retorno da luz pelo sensor. Além disso, o Lidar usa algoritmos sofisticados para filtrar o ruído e as interferências do ambiente, a fim de garantir medições precisas e confiáveis.

O mecanismo Lidar comparar superficialmente com o RADAR (Radio Detection And Ranging), mas para ondas de luz. Ao contrário da imagem RADAR, o Lidar pode fornecer varreduras mais detalhadas e nítidas com equipamentos menores. O Lidar usa sinais que funcionam na faixa nanométrica, enquanto o RADAR requer o uso de antenas que produzem ondas de rádio em frequências muito mais baixas.

Um dos primeiros dispositivos a apresentar uma tecnologia semelhante ao Lidar foi o Project Tango¹, desenvolvido pelo Google em 2014. O Project Tango contava com sensores de profundidade, incluindo uma câmera RGB-IR, um sensor de movimento e um sensor Lidar de rastreamento de movimento.

Em 2016, a Lenovo lançou o Phab 2 Pro, o primeiro smartphone a apresentar a tecnologia Tango, que usava sensores Lidar para mapear o ambiente em 3D e permitir a interação com objetos virtuais em tempo real.

No entanto, os sensores Lidar só começaram a se tornar mais comuns em smartphones a partir de 2020, com o lançamento do iPad Pro da Apple, que apresentou um scanner Lidar para mapeamento em 3D e realidade aumentada. A partir daí, várias empresas,

¹ plataforma de mapeamento 3D desenvolvida pelo Google em 2014.

como a Samsung e a própria Apple, começaram a implementar sensores Lidar em seus smartphones de alta qualidade.

Embora não se trate de um modelo avançado, é possível utilizar diversos mecanismos com esta ferramenta mais barata.

O nível de precisão e erro nas medições com o sensor Lidar pode variar dependendo do modelo do dispositivo e das condições de iluminação e do ambiente em que a medição está sendo feita.

No caso dos *smartphones* e *tablets* mais recentes com scanner Lidar, a precisão é geralmente alta, com uma margem de erro de cerca de alguns centímetros. Por exemplo, a *Apple* afirma que o sensor Lidar em seus aparelhos é capaz de medir a distância com precisão de até 5 metros, com uma margem de erro de apenas alguns centímetros.

No entanto, a precisão pode ser afetada por fatores externos, como a presença de objetos reflexivos ou superfícies espelhadas, que podem refletir a luz do laser e produzir resultados imprecisos. Além disso, a precisão pode ser afetada em ambientes com pouca iluminação ou muita luz solar direta, que podem interferir no desempenho do sensor.

Em resumo, embora o nível de precisão do sensor Lidar nos *textit*smartphones e *tablets* seja geralmente alto, é importante lembrar que as medições com esse tipo de sensor podem ser afetadas por uma variedade de fatores externos. Por isso, é sempre recomendável fazer mais de uma medição e avaliar a precisão dos resultados com cuidado.

É importante evitar a luz solar direta ou reflexos brilhantes que podem interferir no desempenho do sensor Lidar. Além disso, superfícies reflexivas, como espelhos ou superfícies de metal brilhantes, devem ser evitadas ou cobertas, pois podem refletir a luz do laser e produzir resultados imprecisos.

Vários pequenos objetos com dimensões conhecidas foram digitalizados para testar a exatidão e precisão do sensor Lidar. Modelos independentes de um penhasco costeiro foram adquiridos com o "3d Scanner App"² utilizando o sensor Lidar do *smartphones*, via fotogrametria por estrutura a partir do movimento (SfM MVS), e com o aplicativo 'EveryPoint'³ combinando o Lidar do *smartphones* e as fotos da câmera do *smartphones*. Os modelos Lidar foram alinhados aos modelos de referência SfM MVS e as distâncias entre as nuvens de pontos foram analisadas. **Ground Control Point (ponto de controle terrestre) (GCP)** foram usados para alinhamento do modelo e o registro fino foi realizado no CloudCompare (software livre para análise e comparação de nuvens de pontos em 3D) sem alterar a escala dos modelos.

A precisão do modelo in-situ foi testada por comparação de nuvens modelo a

² aplicativo de escaneamento 3D para smartphones, <https://apps.apple.com/br/app/3d-scanner-app/id1419913995>.

³ EveryPoint: combina LiDAR e SfM-MVS para geração de nuvens de pontos, <https://everypoint.co>.

modelo multiescala ([Multi-Scale Model to Model Cloud Comparison \(M3C2\)](#)) entre as nuvens de pontos Lidar, as nuvens de pontos de referência SfM MVS e as nuvens de pontos "EveryPoint". A precisão foi testada comparando vários modelos de *smartphones* equipado com Lidar da mesma área entre si ([LUETZENBURG; KROON; BJØRK, 2021](#)).

Outro sensor promissor que vem sendo testado por diversos grupos de pesquisa está relacionado à geração de nuvens de pontos utilizando as chamadas câmeras de Tempo de Voo (ToF). Esses dispositivos são tipicamente caracterizados por apenas alguns milhares de pixels, uma faixa de medição inequívoca máxima de até trinta metros e pequenas dimensões. Suas principais vantagens, em relação a outras técnicas de medição 3D, incluem a possibilidade de adquirir dados em taxas de quadros de vídeo e obter nuvens de pontos 3D sem varredura e de apenas um ponto de vista.

As câmeras [Time-of-Flight \(tempo de voo\) \(ToF\)](#) geralmente fornecem uma imagem de alcance e uma imagem de amplitude com intensidades de modulação infravermelha em taxas de quadros de vídeo: a imagem de alcance (ou imagem de profundidade) contém, para cada pixel, a distância radial medida entre o pixel considerado e sua projeção no objeto observado, enquanto a imagem de amplitude contém a força do sinal refletido pelo objeto para cada pixel. Em alguns casos, também é fornecida uma imagem de intensidade, que representa a média da luz total incidente no sensor (ou seja, sinal modulado refletido e luz de fundo da cena observada). Conforme relatado em, esses sensores têm sido empregados com sucesso para documentação 3D, apresentando resultados satisfatórios em termos de produtos finais e precisão relacionada. Atualmente, as principais aplicações das câmeras ToF estão relacionadas à navegação de robôs, segurança e monitoramento e logística.

As câmeras de tempo de voo (ToF), conforme descrito por [Losè et al. \(2022\)](#), representam um avanço significativo na geração de nuvens de pontos 3D. Estes dispositivos se destacam por terem poucos milhares de pixels, um alcance de medição claro de até trinta metros e dimensões reduzidas. Suas principais vantagens sobre outras técnicas de medição 3D incluem a capacidade de capturar dados em taxas de quadros de vídeo e criar nuvens de pontos 3D sem necessidade de varredura, a partir de um único ponto de vista. As câmeras ToF fornecem imagens de alcance e amplitude com intensidades de modulação infravermelha, capturando a distância radial e a força do sinal refletido por cada pixel. Em alguns casos, também produzem uma imagem de intensidade, que reflete a luz total incidente no sensor. Esses sensores têm sido usados com sucesso em documentação 3D, oferecendo resultados precisos e satisfatórios. Atualmente, são aplicados principalmente em navegação robótica, segurança e monitoramento, e logística.

Em 2021, os autores [Desai et al. \(2021\)](#) exploraram a precisão do Lidar portátil em comparação com a varredura a laser terrestre para reconstrução de cenas de acidentes de trânsito. O estudo focou em avaliar se tablets ou smartphones poderiam realizar varreduras 3D de veículos com precisão semelhante ao equipamento Lidar de grau topográfico. Os

resultados mostraram que o erro máximo de distância de perfil entre as varreduras Lidar de um iPad e as varreduras Lidar de grau topográfico para um veículo danificado foi de 3 cm, uma precisão provavelmente suficiente para a maioria dos estudos forenses.

2.3 *Dispositivo portátil com tecnologia Lidar X Outros Dispositivos de Captura*

Em estudo realizado por [Desai et al. \(2021\)](#), é proposto uma metodologia para escaneamento de veículo utilizando sensor Lidar, e foi concluído a partir da raiz quadrada média do erro máximo (RMSE) obtido para a distância do perfil entre varreduras portáteis e [Terrestrial Laser Scanning \(varredura a laser terrestre\) \(TLS\)](#) para um veículo danificado foi observado ser de 3 cm, um nível de precisão provavelmente suficiente e aceitável para a maioria estudos forenses. Este nível de precisão é suficiente para a reconstrução da cena do acidente, por ser semelhante ao erro de medição da tecnologia usada atualmente.

No desenvolvimento deste estudo, foram consultadas diversas fontes que detalham metodologias e dispositivos utilizados para a captura de dados em cenários de engenharia e forense, especialmente focados na medição de velocidade de impacto em acidentes e na digitalização tridimensional de objetos. As Tabelas 1 e 2 resumem essas metodologias e dispositivos, destacando as vantagens e desvantagens de cada técnica, assim como os principais métodos de escaneamento 3D e suas características históricas, respectivamente. As Tabelas 1 e 2 são adaptadas de [Desai et al. \(2021\)](#), e oferecem uma visão comparativa que fundamenta a escolha das técnicas utilizadas neste trabalho para a análise dos dados coletados nos cenários investigados.

Tabela 3 – Métodos para determinação da velocidade de impacto em acidentes

Nome do Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Análise da cena do acidente	Investigação da cena do acidente, incluindo avaliação dos danos aos veículos envolvidos e análise da dinâmica do acidente.	Pode ser uma técnica rápida e eficiente para determinar a velocidade de impacto;	Pode ser difícil obter informações precisas em cenários complexos ou em casos em que os danos aos veículos são mínimos;
Cálculo da velocidade pela conservação de energia	A partir da análise dos danos nos veículos envolvidos e de dados como massa e coeficiente de atrito, é possível utilizar equações de conservação de energia para calcular a velocidade de impacto.	Pode ser uma técnica relativamente simples e precisa para determinar a velocidade de impacto;	A precisão pode ser afetada por variáveis como o coeficiente de atrito, que pode variar significativamente dependendo das condições da estrada e dos pneus do veículo;
Cálculo da velocidade pela conservação de momento	Similar ao método anterior, mas utilizando a conservação do momento linear para calcular a velocidade de impacto.	Pode ser uma técnica relativamente simples e precisa para determinar a velocidade de impacto;	A precisão pode ser afetada por variáveis como o coeficiente de atrito, que pode variar significativamente dependendo das condições da estrada e dos pneus do veículo;
Análise de dados de veículos	Análise de dados armazenados nos veículos, como a velocidade do motor e a posição do acelerador, para determinar a velocidade de impacto.	Pode fornecer dados precisos sobre a velocidade do veículo imediatamente antes do impacto;	Nem todos os veículos possuem sensores ou sistemas de armazenamento de dados que possam ser usados para determinar a velocidade de impacto;
Simulação computacional	Utilização de programas de simulação para reconstruir a dinâmica do acidente e determinar a velocidade de impacto.	Pode fornecer dados precisos sobre a velocidade de impacto em cenários complexos;	Pode ser um método dispendioso e demorado, além de depender de uma modelagem precisa do acidente, que pode ser afetada por variáveis desconhecidas ou incertas;

Tabela 4 – Métodos de escaneamento 3D e suas características

Método de escaneamento 3D	Descrição	Ano de criação	Inventor	Referência bibliográfica
Escaneamento a laser (Lidar)	Utiliza um laser para medir a distância entre o scanner e o objeto que está sendo escaneado.	1960	Maiman, T.	Lidar: Remote Sensing and Laser Altimetry
Escaneamento por projeção de luz estruturada	Projeta uma grade de luz sobre o objeto e mede as deformações na grade para determinar a forma do objeto.	1978	Bolles, R. C. e Fischler, M. A.	Shape from Shading: A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object from One View
Escaneamento por fotogrametria	Tira várias fotos de diferentes ângulos do objeto e as combina para criar um modelo 3D.	1849	Laussedat, A.	Aperçu sur quelques applications des photographies descriptives
Escaneamento por tomografia computadorizada (CT)	Coloca o objeto dentro de um equipamento de tomografia computadorizada e o escaneia em várias seções para criar um modelo 3D detalhado.	1972	Cormack, A. M.	Representation of a Function by its Line Integrals, with Some Radiological Applications
Escaneamento por ultrassom	Usa ondas sonoras de alta frequência para medir a distância entre o scanner e o objeto que está sendo escaneado.	1942	Firestone, F. A. e Peters, J. E.	The Velocity of Sound in Tissues and Other Materials
Escaneamento por Lidar móvel	Utiliza um sensor Lidar montado em um veículo ou drone para digitalizar o ambiente e criar um modelo 3D.	2005	Guan, H. et al.	Mobile Laser Scanning and Its Potential Application in Forest Inventory

2.4 Fotogrametria

A fotogrametria, conforme ([American Society of Photogrammetry, 1966](#)), é uma técnica que consiste em obter informações precisas sobre objetos e o meio ambiente através

de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética.

Embora a fotogrametria possa ter dado indícios de surgimento por volta de 1480 com o estudo das perspectivas dos objetos por Leonardo da Vinci, somente em 1849, o cientista francês Aimé Laussedat usou fotografias terrestres para realizar sua primeira pesquisa arquitetônica em perspectiva no Hôtel des Invalides em Paris, sendo reconhecido como o "pai da fotogrametria" (GRANSHAW, 2019). Desde então, a fotogrametria tem sido desenvolvida e aplicada em diversas áreas, tais como a cartografia, topografia, arquitetura, engenharia e geologia, entre outras.

Os primeiros estudos na área de correlação de imagens foram desenvolvidos na década de 1950 por Gilbert Hobrough, que comparou representações analógicas com fotografias para registrar medidas de vários pontos de vista.

Um dos mais antigos estudos para medição de deformação a partir de imagens computacionais é datado de 1982. O método consistia na comparação entre pequenas regiões do objeto antes e depois da deformação. Sutton e outros (1983) desenvolveu algoritmos numéricos e conduziu experimentos de medição utilizando imagens registradas oticamente, chegando-se ao que hoje se conhece por Correlação de Imagem Digital 2D (CID-2D). Apesar da técnica ser antiga, a utilização da fotogrametria digital é recente em trabalhos forenses e se mostra uma ferramenta promissora para ser utilizada em análises de engenharia legal.

A correlação de imagem digital (CID) é amplamente adotada pela comunidade de mecânica sólida e aplicada para medir campos de deformação (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2009) (GÓRSZCZYK; MALICKI; ZYCH, 2019). A base da técnica CID é considerar um conjunto de pontos na imagem de referência e obter o conjunto correspondente na imagem deformada. A forma numérica (forma digital) das imagens é uma grande matriz, na qual cada componente representa o estado de uma única unidade, conhecida como pixel, na imagem. Depois de processar a imagem, o campo de deslocamento e o movimento de todas as unidades existentes na imagem podem ser alcançados. Nesta técnica, as informações das regiões adjacentes também são utilizadas para medir o campo de deslocamento da área desejada, porém o custo computacional é muito alto.

O CID funciona comparando fotografias digitais de um componente ou de uma peça de teste em diferentes estágios de deformação. Ao rastrear blocos de pixels, o sistema pode medir o deslocamento da superfície e criar campos vetoriais de deformação 2D e 3D completos e mapas de deformação. Para que o CID funcione de maneira eficaz, os blocos de pixels precisam ser aleatórios e únicos, com uma variedade de níveis de contraste e intensidade. Não requer iluminação especial e, em muitos casos, a superfície natural da estrutura ou do componente têm textura de imagem suficiente para que o CID funcione sem a necessidade de qualquer preparação especial da superfície.

Para aumentar a precisão da técnica CID, uma interpolação de ordem superior pode ser usada. A possibilidade de realizar experimentos em uma ampla gama de escalas, desde escalas microscópicas até as macroscópicas, é outra vantagem desse método. Além disso, pode ser feito nos modos 2D e 3D (medidas de correlação de imagem digital volumétrica 3D (VDIC)) (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2009).

No presente estudo, é utilizada uma técnica de CID 2D. Dois parâmetros que influenciam a precisão das imagens capturadas nessa técnica são a faixa numérica de um pixel (resolução em níveis de cinza) e o número de pixels. Uma faixa numérica maior para cada pixel melhora a distinção entre diferentes intensidades de luz e cores, aumentando a precisão da imagem. Além disso, um número maior de pixels em uma imagem aprimora ainda mais sua precisão.

Considerando o valor das ferramentas computacionais existentes para análise de imagens, o estudo proposto por este trabalho utiliza-se de uma ferramenta de código aberto que permitirá a análise de casos complexos por meio da fotogrametria.

O programa utilizado, de domínio público, é o ImageJ (programa gratuito de análise de imagens desenvolvido pelo NIH – Instituto Nacional de Saúde dos Estados Unidos da América), desenvolvido em Java. A leitura de arquivos de imagem pode ser realizada simultaneamente a outras operações e a janela de resultados exibe informações como área, perímetro e orientação, que podem ser exportadas para outros softwares de análises. No ImageJ, o cálculo da área é feito contando os pixels das regiões selecionadas pelo usuário ou por um algoritmo específico (RASBAND,). As aplicações mais relevantes deste software ainda estão associadas à medição de área, à contagem de partículas aplicadas à biologia celular e ao estudo do DNA, à agricultura e à astronomia. Este trabalho, ainda, é inovador na aplicação deste software para estudo de ciências forenses em análise de colisões veiculares e no cálculo da velocidade de impacto.

A partir de uma imagem de um sinistro de colisão e da calibração do software com medidas do modelo real, poderá se estimar as profundidades de deformação e, através dos métodos de energia, calcular a velocidade de colisão.

Em 2007, a autora O'Shields (2007) conduziu um estudo focado no uso do PhotoModeler, um pacote de software fotogramétrico de curto alcance, em várias aplicações de reconstrução de acidentes de trânsito. O estudo é composto por três partes distintas: medição de esmagamento de veículo, medição de curva de estrada e uma avaliação de metodologias comuns de medição em reconstrução de acidentes de trânsito. A pesquisa aplicou o processo fotogramétrico a informações de colisões controladas geradas pela Administração Nacional de Segurança no Trânsito nas Rodovias (NHTSA) e utilizou um procedimento estatístico conhecido como bootstrap⁴ para examinar a variabilidade.

⁴ Efron, B. (1979). Bootstrap methods: another look at the jackknife. The Annals of Statistics.

Conforme discutido por [Luhmann et al. \(2006\)](#) em seu trabalho, é explorado fotogrametria de curto alcance, abordando seus princípios, técnicas e aplicações. O livro abrange tecnologia de imagem, métodos analíticos, processamento de imagem digital e sistemas de medição fotogramétrica, oferecendo insights sobre comparadores, sistemas de câmera única, sistemas de processamento estereoscópico e conceitos de medição.

Em 2021, os autores [Honório et al. \(2021\)](#) apresentaram uma pesquisa que emprega campos de deslocamento fotogramétricos para estimar distribuições de tensão em tempo real em sistemas estruturais durante um período de carga. A metodologia proposta utiliza a técnica de deslocamento de imagem para gerar nuvens de pontos e reconstruir superfícies 3D, e o Método de Elementos de Contorno (BEM) para avaliar valores de tensão em sólidos. A pesquisa validou os resultados comparando medidas de deformação em uma barra de alumínio usando sensores ópticos de fibra de grade de Bragg de longo período (LPFGs) e a estratégia proposta, demonstrando eficácia e potencial aplicação em várias tarefas para determinar distribuições de tensão em tempo real em estruturas.

Foi proposto por [Costa, Rauhen e Fronza \(2020\)](#) um método alternativo para estimar a velocidade de um veículo com trajetória longitudinal relativa à câmera, utilizando o "fator de escala de imagem em pixels" para calcular a distância do veículo à câmera em diferentes quadros de vídeo. Os resultados, verificados por meio de uma simulação com um veículo movendo-se a velocidades conhecidas, mostraram um pequeno desvio, apoiando o uso forense do método em estimativa de velocidade por análise de vídeo.

Sob o mesmo ponto de vista, os autores [Šarić et al. \(2022\)](#) exploraram a aplicação da fotogrametria na análise de processos de colisão de veículos. O artigo discute como a fotogrametria, através da criação de modelos 3D, pode clarear a intensidade e a conformidade mútua dos danos aos veículos, aumentando a relevância da posição de colisão determinada. O mesmo detalha o uso de algoritmos como o [Structure from Motion – Multi-View Stereo \(SfM–MVS\)](#) e o SIFT para analisar fotografias de veículos danificados e compara os resultados com dados de testes de colisão, fornecendo insights sobre a velocidade e a energia envolvidas nas colisões.

2.5 ImageJ

O ImageJ⁵ foi projetado com uma arquitetura aberta que fornece extensibilidade por meio de plug-ins Java e macros graváveis e plug-ins personalizados de aquisição. Os plug-ins escritos pelo usuário permitem resolver muitos problemas de processamento e análise de imagens, desde imagens tridimensionais de células vivas até o processamento de imagens radiológicas, de comparações de dados de vários sistemas de imagem até sistemas

⁵ <https://imagej.nih.gov/ij/>, acesso em 6 mai. 2024

automatizados de hematologia ((BURGER; BURGE, 2006); (BARBORIAK et al., 2005); (ELICEIRI; RUEDEN, 2007)).

O software pode exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8 bits, 16 bits e 32 bits, bem como ler muitos formatos de imagem. O ImageJ pode calcular estatísticas de valor de área e pixel de seleções definidas pelo usuário; medir distâncias e ângulos; criar histogramas de densidade e gráficos de perfil de linha. Este sistema suporta funções de processamento de imagem padrão, como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de borda e filtragem mediana.

O ImageJ pode ser executado como um mini aplicativo online, para download ou em qualquer computador com uma máquina virtual Java 5 ou posterior. Distribuições para download estão disponíveis para Microsoft Windows, Mac OS clássico, macOS, Linux e Sharp Zaurus PDA. O código-fonte do ImageJ está disponível gratuitamente no site do software.

2.6 A Fotogrametria no Estudo Forense

A capacidade da fotogrametria para refazer cenas de acidentes de carro é extremamente importante para a polícia e especialistas forenses que investigam as consequências desses tipos de eventos. Isso ocorre porque acidentes de carro podem resultar em lesões corporais significativas, em danos à propriedade e, também, em morte. Muitas das vezes, os veículos envolvidos no acidente não estão mais disponíveis para análise, restando apenas evidências fotográficas. Dentre os principais métodos existentes de medição sem contato, está a Figura 5. que ilustra a vantagem da fotogrametria de curta variação (Close Range Photogrammetry) com relação à acuracidade e ao tamanho dos objetos.

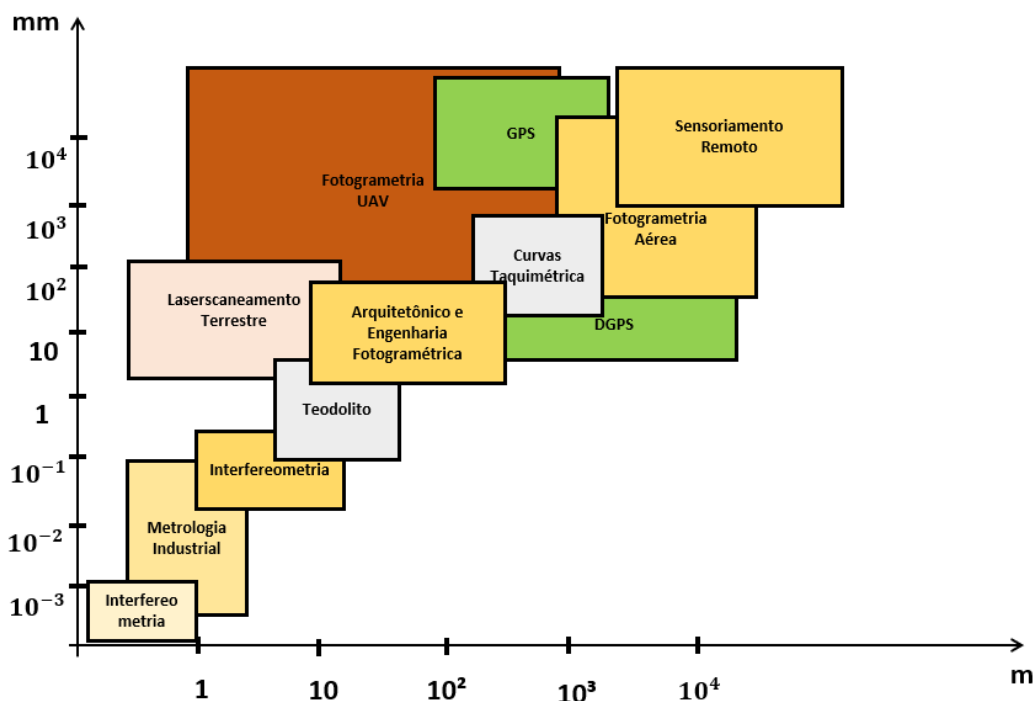


Figura 5 – Relação entre tamanho do objeto e acuracidade para diferentes métodos de medições sem contato.

A partir da metodologia aqui descrita em conjunto com a imagem digital produzida pelo software ImageJ, é possível se obter informações necessárias aos cálculos físicos para o caso analisado. As medidas espaciais conseguem gerar medidas de distância, área e volume. Medidas estas que envolvem as duas primeiras dimensões da imagem, sua largura e altura. Já as medições de densidade envolvem a terceira dimensão, como os valores de pixel. Os valores de pixel podem representar temperatura, elevação, salinidade, densidade populacional ou praticamente qualquer fenômeno que se possa quantificar. Neste sentido, a fotogrametria permitirá aos especialistas forenses realizar medições mesmo em um caso particular de uma colisão que se deu há anos e que os veículos avariados não estejam mais disponíveis para uma perícia técnica. Entre as diversas grandezas e aplicações que a fotogrametria pode fornecer, este trabalho concentrará na medição de deformações para cálculo de velocidade de colisão com objetos fixos.

Antes de fazer medições significativas, é necessário calibrar a imagem, ou seja, "dizer" ao software o que um pixel representa em termos de tamanho ou distância do mundo real (calibração espacial), em termos do significado dos valores de pixel (densidade calibração) ou ambos.

2.7 Metodologia

A metodologia proposta para este estudo visa estabelecer um procedimento técnico padronizado para estimativa da velocidade de colisão com base na deformação frontal

de veículos. O processo é dividido em dois ramos principais, conforme a possibilidade de acesso físico ao veículo sinistrado: escaneamento tridimensional com sensor LiDAR (quando o veículo está acessível) ou análise por fotogrametria a partir de imagens (quando apenas registros visuais estão disponíveis) (ŠARIĆ et al., 2022; DESAI et al., 2021).

A Figura 6 apresenta o fluxograma completo com as etapas do processo metodológico.

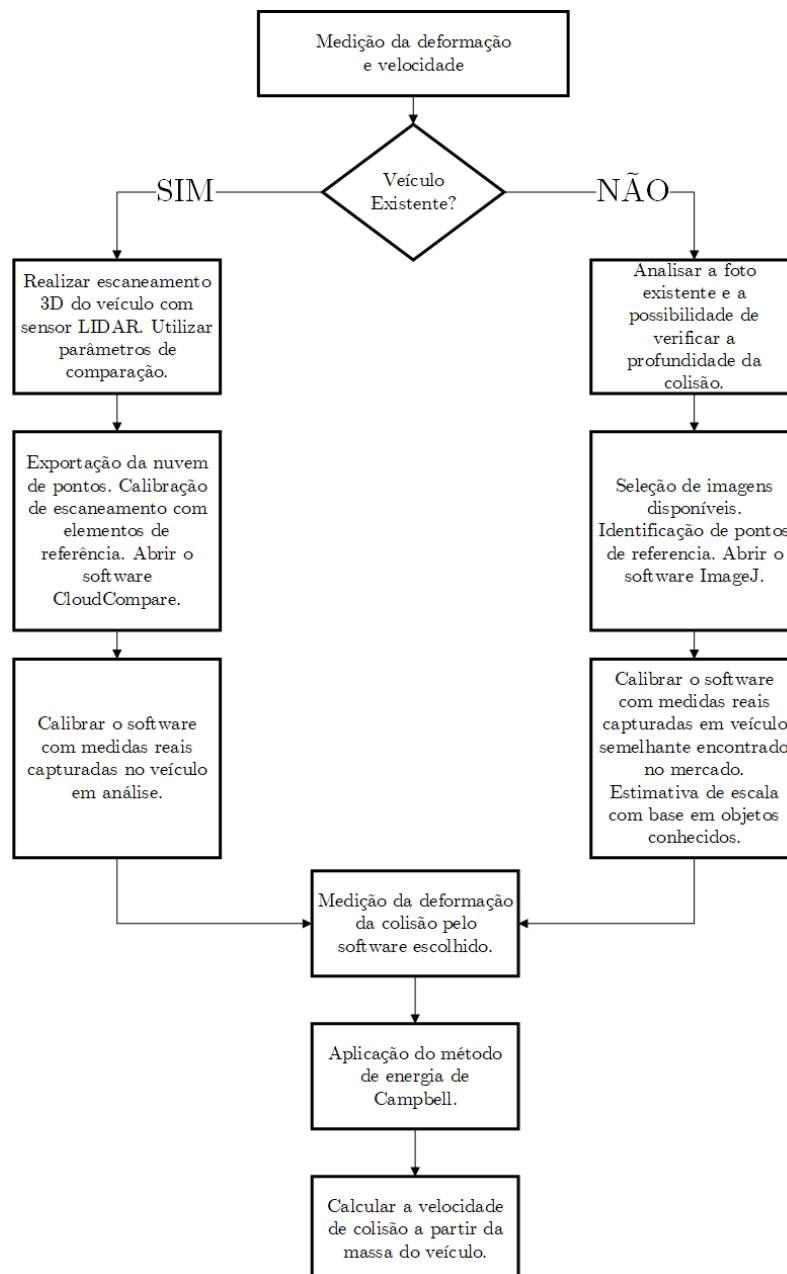


Figura 6 – Fluxograma metodológico para medição da deformação e cálculo da velocidade de colisão.

A escolha dos procedimentos técnicos e metodológicos empregados para registrar os elementos presentes no local do evento deve estar diretamente relacionada com os fundamentos científicos utilizados para processar os dados obtidos. Os princípios físicos mais comuns empregados no cálculo de velocidade em acidentes de trânsito baseiam-se

predominantemente na Mecânica Newtoniana para Corpos Rígidos e, mais recentemente, na Mecânica dos Corpos Deformáveis, por meio de métodos analíticos ou computacionais (CAMPBELL, 1974; WACH, 2014). A análise pericial, em diversas ocasiões, limita-se a vestígios visuais como fotografias ou vídeos, exigindo o uso de técnicas confiáveis de reconstrução.

Neste estudo, a análise da velocidade foi realizada por meio da fotogrametria veicular no software ImageJ (RASBAND, ; DIAS, 2008). As medições extraídas foram comparadas a valores obtidos diretamente no veículo, para fins de validação. Quando o veículo pôde ser acessado fisicamente, recorreu-se ao escaneamento 3D com sensor LiDAR integrado a dispositivos móveis, como o iPhone 13 Pro Max, o que permitiu maior precisão na estimativa da profundidade da deformação (LUETZENBURG; KROON; BJØRK, 2021; LOSÈ et al., 2022).

2.7.0.1 Critérios de validação e cálculo do erro

A validação da metodologia foi conduzida por meio da comparação entre as deformações medidas com o ImageJ e os valores obtidos diretamente no veículo com régua milimetrada, para os casos com acesso físico. O erro foi quantificado pela raiz do erro quadrático médio (RMSE) (POPA; BELES, 2013):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^{\text{ref}})^2}$$

onde x_i representa a medida obtida no ImageJ e x_i^{ref} é a medida de referência capturada no campo. Para os casos sem acesso ao veículo, foi adotado um erro estimado com base na literatura, da ordem de 5% (KUBIAK et al., 2014).

2.7.1 Procedimento de escaneamento com LiDAR

Nos casos em que o veículo colidido pôde ser acessado fisicamente, foi utilizado o sensor LiDAR integrado ao iPhone 13 Pro Max. O escaneamento foi realizado com o aplicativo 3D Scanner App (iOS), que permite captura da nuvem de pontos em tempo real. Para garantir qualidade nos dados, o dispositivo foi mantido a uma distância média de 1,5 metro da superfície deformada, em movimento contínuo e sob iluminação controlada, evitando superfícies refletivas (DESAI et al., 2021; LOSÈ et al., 2022).

Após a captura, os dados foram exportados em formato .PLY e calibrados no software CloudCompare⁶. por meio de elementos de referência (ex.: placa veicular com largura conhecida) (GIRARDEAU-MONTAUT, 2006). A malha tridimensional obtida foi

⁶ <https://www.danielgm.net/cc/>, acesso em 24 abr. 2025

utilizada para a análise das deformações e cálculo da profundidade (c), a qual serviu como entrada para os modelos empíricos de cálculo de velocidade (CAMPBELL, 1974).

As especificações técnicas do sensor LiDAR estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do sensor LiDAR do iPhone 13 Pro Max

Parâmetro	Especificação
Dispositivo utilizado	iPhone 13 Pro Max
Sensor LiDAR	Sony DepthSense (integrado)
Alcance nominal	Até 5 metros
Precisão estimada	Entre 5 mm e 20 mm
Resolução angular	~0,5° (estimada)
Taxa de amostragem	15–30 fps
Formatos exportáveis	PLY, OBJ, STL
Software de escaneamento	3D Scanner App (iOS)
Software de calibração/análise	CloudCompare, ImageJ
Condições de escaneamento	Distância média de 1,5 m; iluminação difusa

2.7.2 Análise de deformações por imagens com o software ImageJ

Nos casos em que não foi possível o acesso físico ao veículo, a análise da deformação foi realizada com o software ImageJ, baseado em princípios de fotogrametria digital (O'SHIELDS, 2007; LUHMANN et al., 2006). A imagem do veículo foi importada, convertida para escala de cinza (8 bits) e calibrada com base em um elemento de escala conhecido, como placas veiculares ou rodas padrão (DIAS, 2008; BARBORIAK et al., 2005).

Com a ferramenta “Set Scale”, foi possível determinar a relação pixel–medida. Em seguida, utilizaram-se ferramentas de medição linear para estimar a profundidade (c), largura (w) e altura (h) da área deformada. As medições foram repetidas ao menos três vezes em pontos distintos, com cálculo da média e desvio-padrão. As medidas serviram de entrada para os modelos empíricos de cálculo de energia e velocidade, como o de Campbell (CAMPBELL, 1974).

As etapas do procedimento no ImageJ estão organizadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Etapas do procedimento de medição de deformação com o ImageJ

Etapa	Descrição
1	Importação da imagem para o ImageJ
2	Conversão da imagem para 8 bits (escala de cinza)
3	Identificação de referência com dimensão conhecida (ex.: placa)
4	Calibração da escala com a ferramenta “Set Scale”
5	Aplicação da ferramenta “Straight Line” para medir deformações
6	Repetição das medições e cálculo de média e desvio-padrão
7	Cálculo da profundidade c para uso em equações de velocidade

CAPÍTULO 3

Resultados

3.1 Dispositivo de Captura

Para o escaneamento do veículo, foi utilizado um aparato equipado com fontes de LED controláveis e que possibilita maior estabilidade na captura e regulação da luz para o scanner (cor e intensidade), conforme Figura 7.



Figura 7 – Aparelho para estabilização e luz do escaneamento.

3.2 Descrição do Estudo de Caso

A validação da metodologia foi realizada a partir do estudo de caso de dois acidentes de colisão frontal em veículos descritos na Tabela 7 e Figura 8a e Figura 8b.

Tabela 7 – Tipos de Colisão e Veículos Envolvidos

Veículo	Tipo de Colisão	Denominação
Citroen C4 Pallas 2009	Colisão Frontal com Árvore	V1
Porsche Cayenne 2011	Colisão Frontal com Poste	V2



(a) V1



(b) V2

Figura 8 – Vista dos veículos após colisão frontal com objeto fixo (a) V1 e (b) V2.

3.3 Metodologias de Medição

3.3.1 Medições In Loco

A análise de V1, conforme Figura 9a e Figura 9b, partiu da vistoria do veículo após colisão, seguido das medições das deformações.

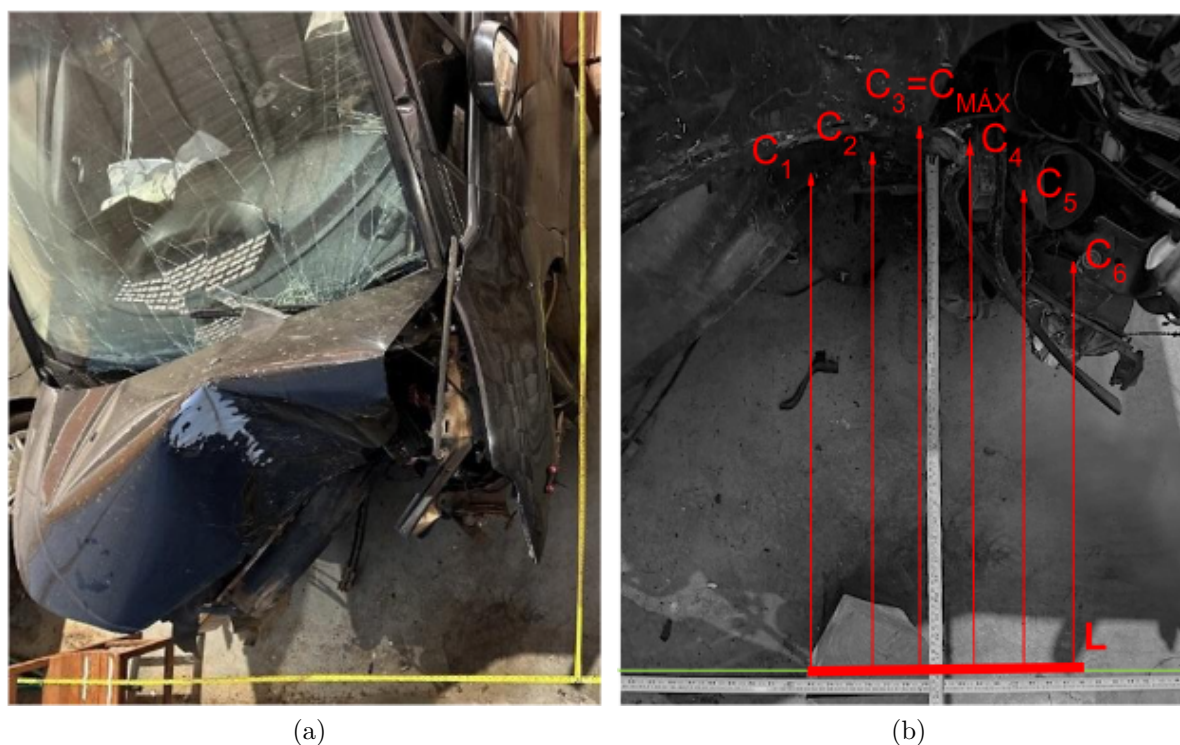
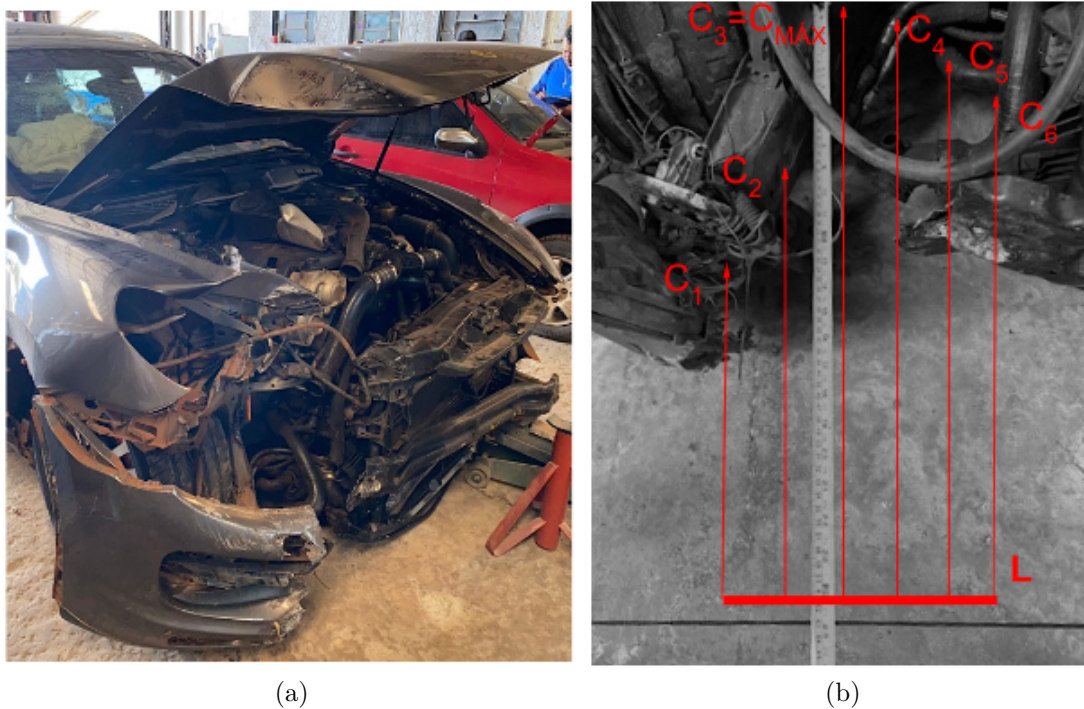


Figura 9 – Medições das deformações C_n no veículo V1.

Com o auxílio de uma escala métrica, mensurou-se que o veículo V1 teve maior profundidade de deformação medida ($C_{MÁX}$), de 70 cm, ponto de maior profundidade que se refere ao ponto mais profundo no qual a árvore atingiu. Para o veículo V2, a maior profundidade de deformação medida ($C_{MÁX}$) foi de 63 cm, conforme Figura 10a e Figura 10b, onde é mensurado a maior profundidade ao qual o poste de concreto atingiu.

Figura 10 – Medições das deformações C_n no veículo V2.

3.3.2 Escaneamento com LiDAR

Com o auxílio de um smartphone equipado com o sensor LiDAR e do dispositivo de captura, foram escaneados os veículos V1 e V2, para que fosse possível gerar a nuvem de pontos e malhas reais. Os resultados renderizados do escaneamento são apresentados na Figura 11a e Figura 11b.



Figura 11 – Escaneamento 3D dos veículos utilizando o sensor LiDAR.

Após a identificação dos veículos, do ano e do modelo, foi obtido em banco de dados um objeto 3D semelhante sem avarias, a fim de elaborar a comparação com o veículo

avariado. O desenvolvimento do veículo em software de modelagem permitiu gerar a malha e nuvem de pontos associada ao estado ausente de avarias. A comparação entre os modelos foi possível através do software CloudCompare, disponível em código aberto. Trata-se de software de processamento de nuvem de pontos 3D com malhas triangulares e imagens calibradas (GIRARDEAU-MONTAUT, 2006). O cálculo das distâncias entre as nuvens de pontos dos dois modelos (modelo sem deformação e modelo avariado) foi possível devido ao algoritmo de reconhecimento da maior parcela de pontos comuns disponível no software, permitindo que os dois objetos estejam o mais alinhados possível. Através da comparação, é possível obter-se (via software) a maior distância de deformação pra V1, CMÁX igual a 64 cm, conforme Figura 12. Onde conforme legenda temos que a coloração laranja e vermelha indica as maiores profundidades de deformação.

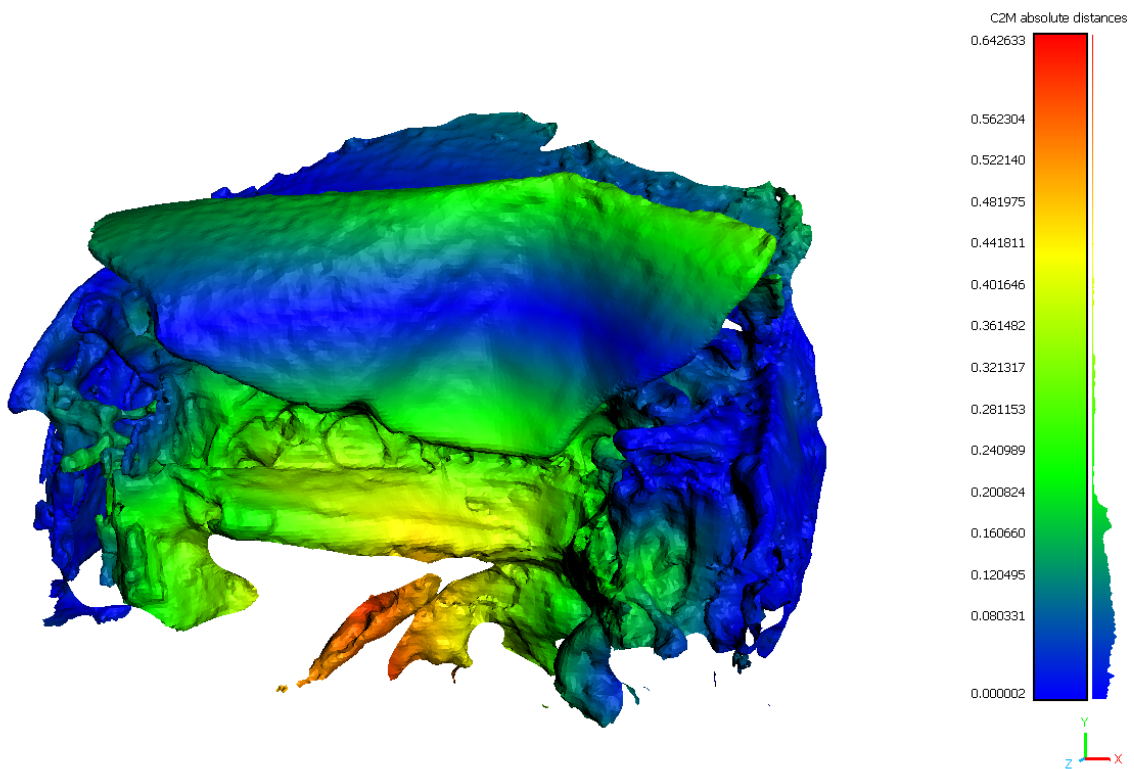


Figura 12 – Comparação de nuvens de pontos para V1 no CloudCompare.

A Figura 13 apresenta a sobreposição das malhas do veículo avariado e do veículo sem deformação.

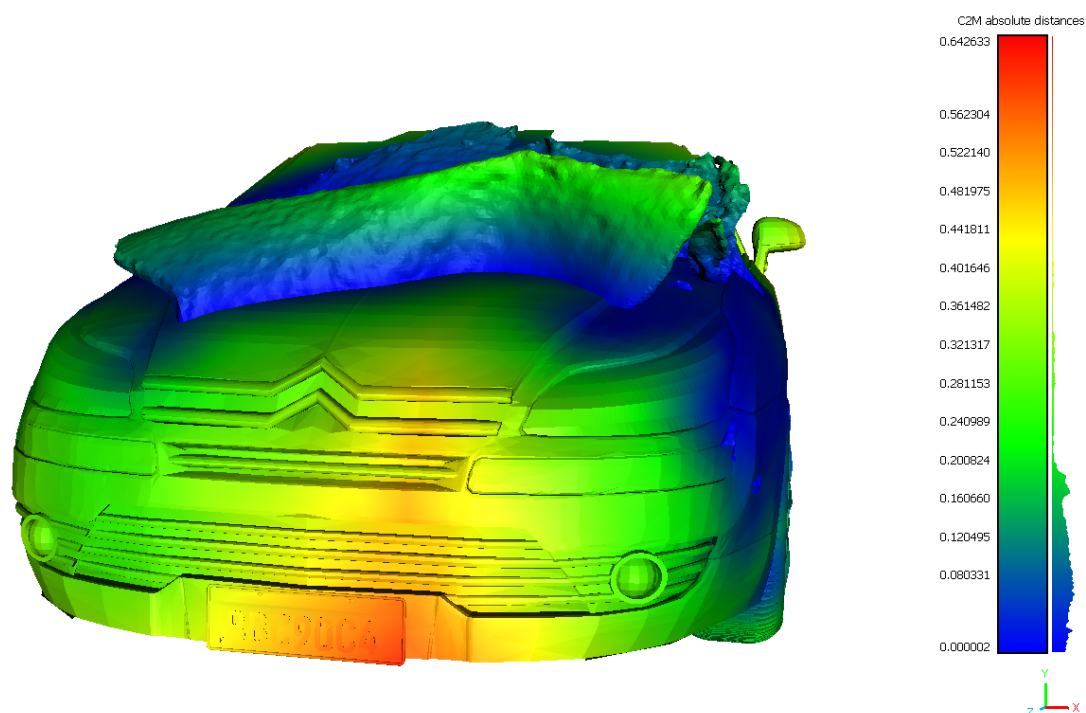


Figura 13 – Sobreposição das malhas de V1 avariado e sem deformação.

A metodologia foi reproduzida para o veículo V2. Com o auxílio do software e da sobreposição dos modelos avariado e sem deformação, foi possível obter a maior distância de deformação para V2, $CMÁX$ igual à 55 cm, conforme Figura 14. Finalmente, gerou-se uma vista 3D que compara a superfície 3D do veículo avariado com o modelo sem deformações Figura 15.

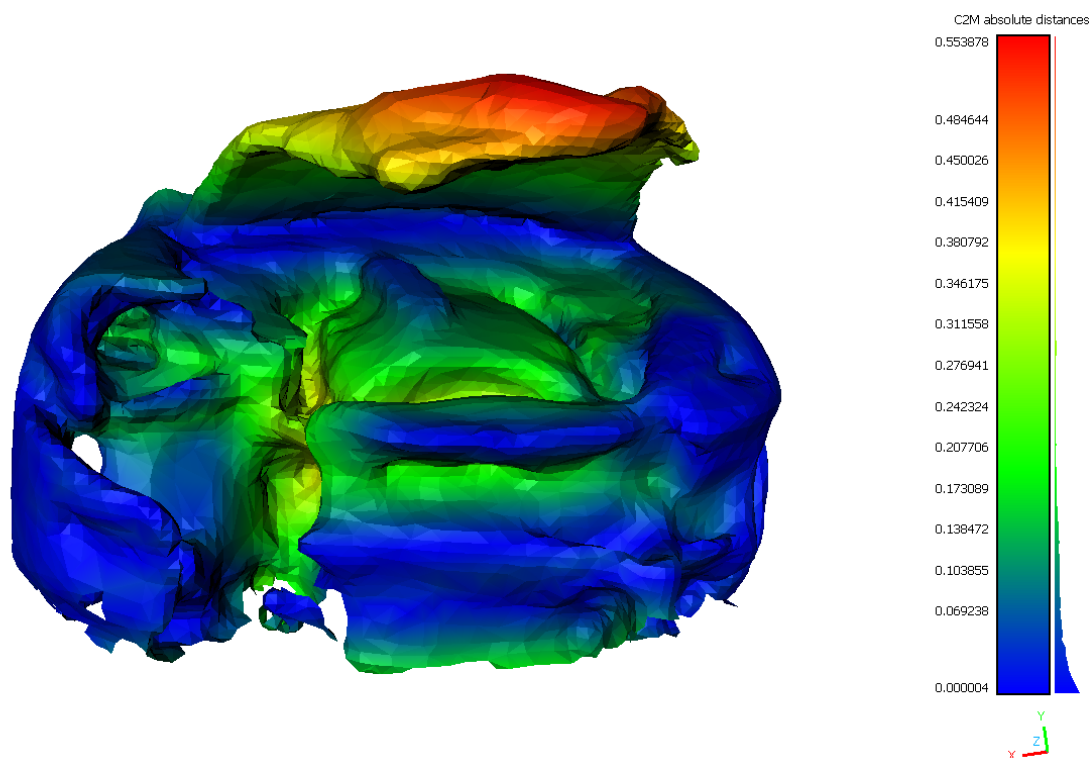


Figura 14 – Comparação de nuvens de pontos para V2 no CloudCompare.

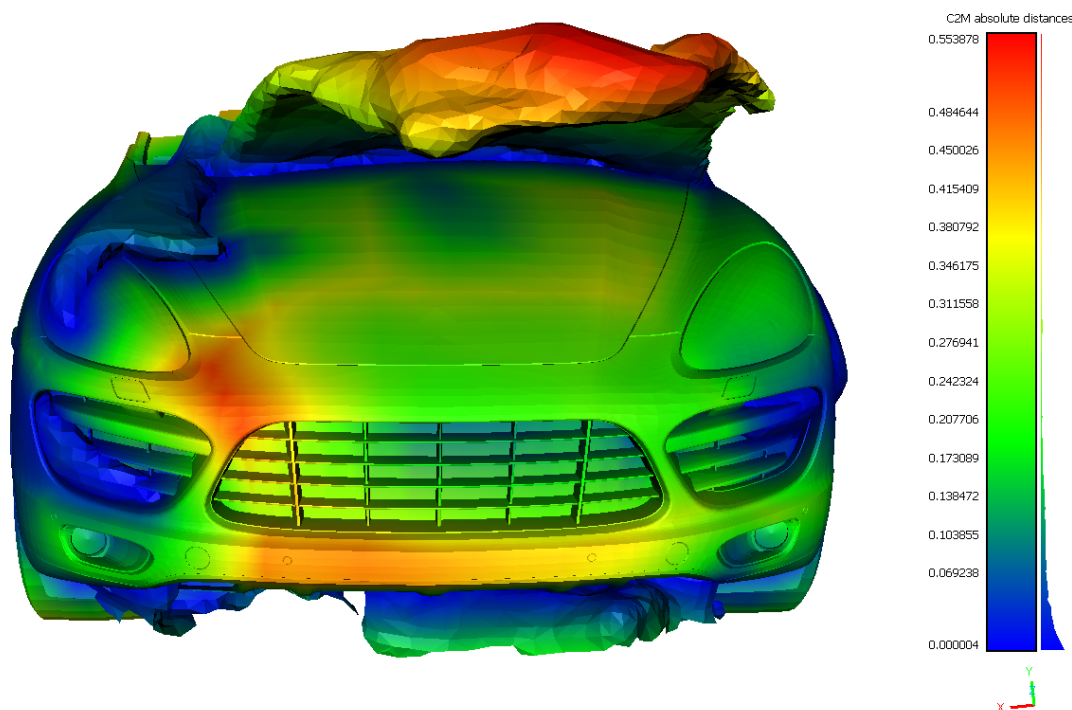


Figura 15 – Sobreposição das malhas de V2 avariado e sem deformação.

3.3.3 Detalhamento do Método de Campbell

O método de Campbell fundamenta-se na caracterização da curva força–deformação em colisões, modelando a resistência do veículo como:

$$F(x) = a x + b x^2,$$

em que x é a profundidade de deformação e a , b são constantes empíricas ajustadas por regressão. A energia de deformação total corresponde à integral dessa força até a profundidade máxima C_{\max} :

$$E = \int_0^{C_{\max}} F(x) dx = \frac{a}{2} C_{\max}^2 + \frac{b}{3} C_{\max}^3.$$

Os valores de a e b foram determinados a partir dos dados de calibração, resultando nas energias listadas nas Tabelas 12 e 13.

3.3.4 Análise com ImageJ

A aplicação da metodologia foi realizada a partir do estudo de caso de dois acidentes de colisão frontal em dois veículos descritos na Tabela 7 e Figura 8a e Figura 8b.

Inicialmente, são analisadas e estudadas as situações de colisão pelas quais os veículos passaram, para que, posteriormente, se chegue às deformações de V1 e V2, conforme (SCHINDELIN et al., 2012). Através da medição da deformação pela imagem dos eventos utilizando o software ImageJ, calibrando as medidas através de dimensões conhecidas (dc) e padronizadas do veículo, são obtidos os valores de deformação C1 a C6, da deformação frontal dos veículos com os postes. Tal deformação, possibilita o cálculo da energia de deformação do veículo pelo método de Campbell para cálculo da velocidade de colisão do veículo com o poste. Para a calibração do software, utilizaram-se medições nos veículos em regiões que não obtiveram deformação que pudesse vir a comprometer a análise e calibração.

3.3.4.1 Estudo das Deformações de V1

O primeiro veículo de análise (Figura 16), denominado de V1, foi identificado e analisado após uma colisão com poste de concreto.



Figura 16 – Vista do veículo sinistrado.

O veículo foi analisado e medido (Figura 17) para que sejam calibrados os parâmetros para realizar a análise de deformação no veículo. É definido como valores de entrada para a calibração do veículo conforme apresentado pela Tabela 8.



Figura 17 – Fotogrametria de V1.

Tabela 8 – Calibração medidas reais com medidas da imagem em análise para V1 (4032×3024 px, 8 bits)

Medida	Valor Real	Valor na Imagem
1 – Largura Maçaneta	16 cm	256 px
2 – Largura Porta Motorista	105 cm	1452 px
3 – Altura Porta	138 cm	1277 px
Calibração Linear	14,1068 pixels/cm	

Antes de realizar o processo de linearização e geração de curva, a imagem do veículo foi convertida em 8-bit grayscale. Conforme estudo desenvolvido por Dias (2008), o software utiliza o processo de segmentação por watershed, o qual tem começo a partir de um pixel (elemento de imagem) inicial chamado de semente, que se agrega com os demais pixels de acordo com critérios pré-estabelecidos. Entre esses critérios, estão: 8 bits (nível de cinza), cor, textura, ou demais características dos pixels.

Caso a imagem original seja de 16 ou 32 bits, será necessária sua transformação para 8 bits (Figura 18) (níveis de cinza entre 0-255, necessário para o cálculo da transformação watershed), para, então, obter-se a imagem binária.

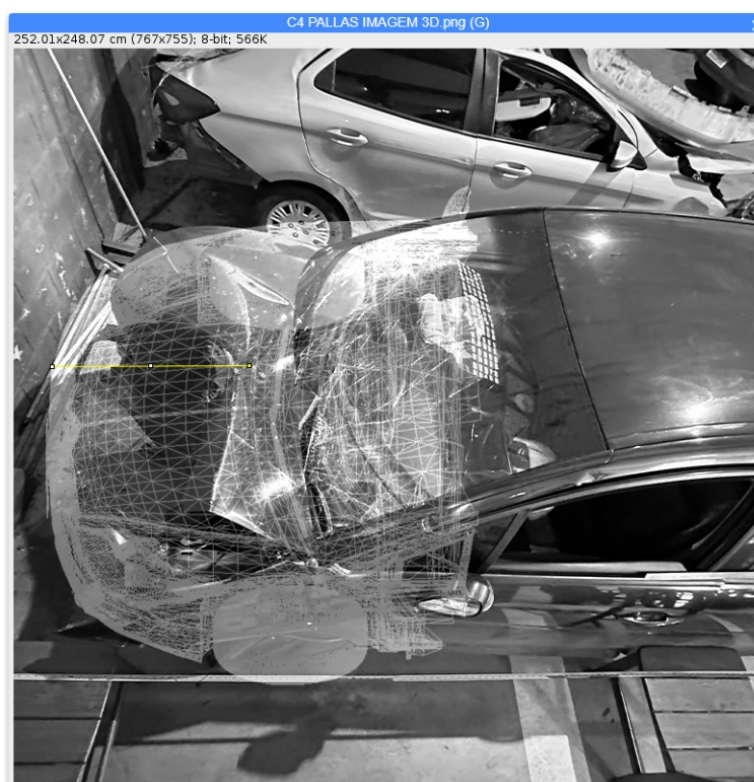


Figura 18 – Medição da região de deformação de V1.

Após entrada de valores de calibração, foi utilizado o método de linearização escalar (Figura 19), e gerada a curva de calibração.

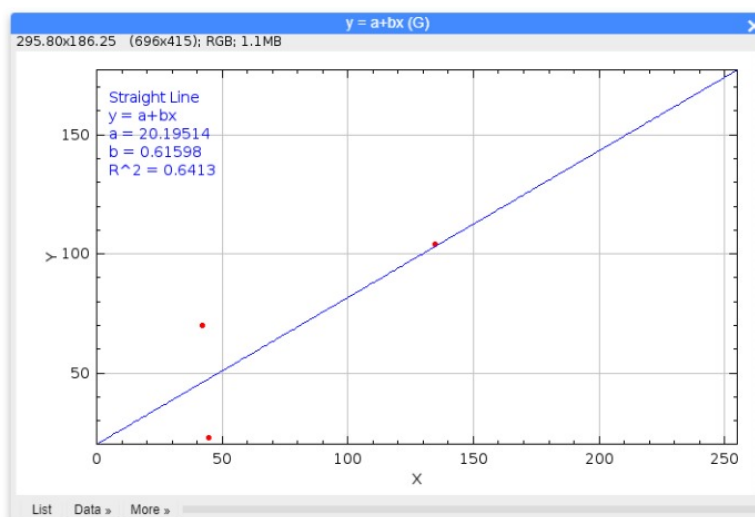


Figura 19 – Regressão linear para calibração através do ImageJ.

Após calibração, foi mensurado o valor de deformação do veículo junto ao software, e identificado o valor de 70 cm. Em medições reais do veículo, o valor de deformação do mesmo foi de 66,3 cm (Figura 20a e Figura 20b).

Results						
File	Edit	Font	Results			
	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	282.000	134.862	33.199	251.382	9.429	280.794
2	70.000	41.918	3.609	102.638	-0.830	69.007
3	219.000	44.679	0.000	138.333	0.000	218.000
4	21.916	85.403	35.906	177.270	-179.716	66.372

(a) V1



(b) V2

Figura 20 – Resultados de deformação obtidos (a) na medição real e (b) no software para V1.

Tabela 9 – Valores segmentados de deformação frontal (C1 a C6) para os veículos V1 e V2

Veículo	C1 (cm)	C2 (cm)	C3 (cm)	C4 (cm)	C5 (cm)	C6 (cm)
V1 (Citroen C4)	38,2	45,5	66,3	64,1	42,7	35,6
V2 (Porsche Cayenne)	36,4	44,9	69,1	62,3	39,8	32,5

3.3.5 Cálculo da Energia de Deformação

Para detalhar o caminho numérico que leva à energia de deformação total, apresentamos no Quadro 10 os valores de energia incremental ΔE_i para cada intervalo de

deformação $C_{i-1} \rightarrow C_i$, calculados pela formulação de Campbell (CAMPBELL, 1974):

$$\Delta E_i = \int_{C_{i-1}}^{C_i} (a x + b x^2) dx = \frac{a}{2}(C_i^2 - C_{i-1}^2) + \frac{b}{3}(C_i^3 - C_{i-1}^3),$$

com $C_0 = 0$. Os coeficientes a e b foram determinados a partir dos dados de calibração por regressão linear (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

$$\begin{aligned} a_{V1} &= 742,3 \text{ N/cm}, & b_{V1} &= 108,6 \text{ N/cm}^2, \\ a_{V2} &= 1019,5 \text{ N/cm}, & b_{V2} &= 152,9 \text{ N/cm}^2. \end{aligned}$$

Tabela 10 – Cálculos Intermediários de Energia de Deformação via Campbell

Veículo	Segmento ($C_{i-1} \rightarrow C_i$) (cm)	ΔE_i (N · m)
V1	0 → 35,6	2 103 493
V1	35,6 → 38,2	455 811
V1	38,2 → 42,7	935 498
V1	42,7 → 45,5	683 196
V1	45,5 → 64,1	6 880 505
V1	64,1 → 66,3	1 122 175
V2	0 → 32,5	2 287 249
V2	32,5 → 36,4	845 135
V2	36,4 → 39,8	886 885
V2	39,8 → 44,9	1 619 876
V2	44,9 → 62,3	8 658 176
V2	62,3 → 69,1	4 945 587

A soma de todos os ΔE_i resulta na energia de deformação total até C_{\max} :

$$\begin{aligned} E_{\text{total},V1} &= \sum_i \Delta E_i = 1,218 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}, \\ E_{\text{total},V2} &= \sum_i \Delta E_i = 1,924 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}. \end{aligned}$$

3.3.5.1 Estudo das Deformações e Velocidade de Colisão de V2

A análise de V2 (Figura 21a e Figura 21b) se deu inicialmente pela vistoria do veículo após colisão, podendo ser realizadas medições e constatado, por meio das características de avarias, que este colidiu frontalmente com um poste de concreto.

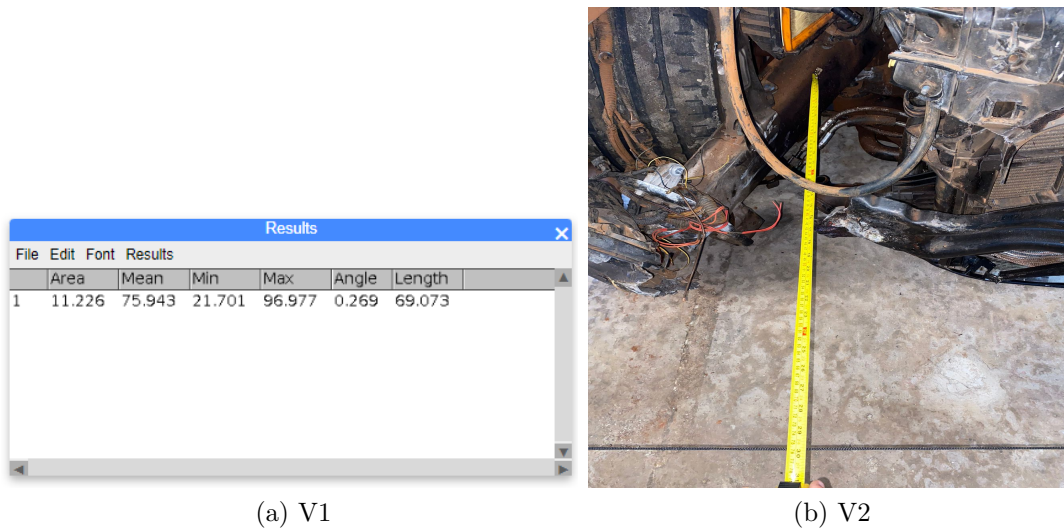


Figura 21 – Veículo 2 em análise (a) avariado e (b) sem avarias para medições reais.

A Tabela 11 apresenta a calibração dos valores obtidos entre a medição real de modelo semelhante ao sinistrado e a medida através do software ImageJ.

Tabela 11 – Calibração medidas reais com medidas da imagem em análise para V2 Porsche (1599×899 px, 8 bits)

Medida	Valor Real	Valor na Imagem
1 – Largura do Vidro Porta Traseira	64 cm	166 px
2 – Largura Vidro Dianteiro Retrovisor	78 cm	110 px
3 – Altura Porta	128 cm	332 px
Calibração Linear	2,5313 pixels/cm	

A partir dos dados da Tabela 4, a regressão linear uniformizará os valores das medidas, conforme Figura 22.

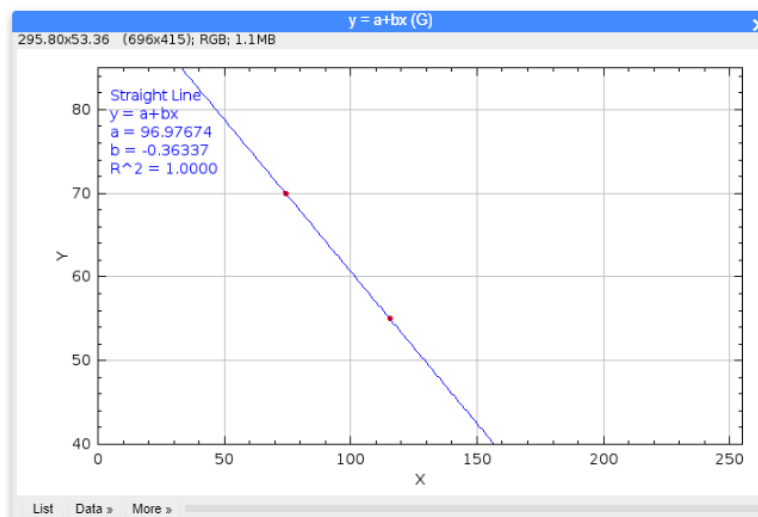


Figura 22 – Fotogrametria de V2.

Calibrado o software com a imagem apresentada, foi possível realizar-se a medição do valor de deformação (Figura 23).

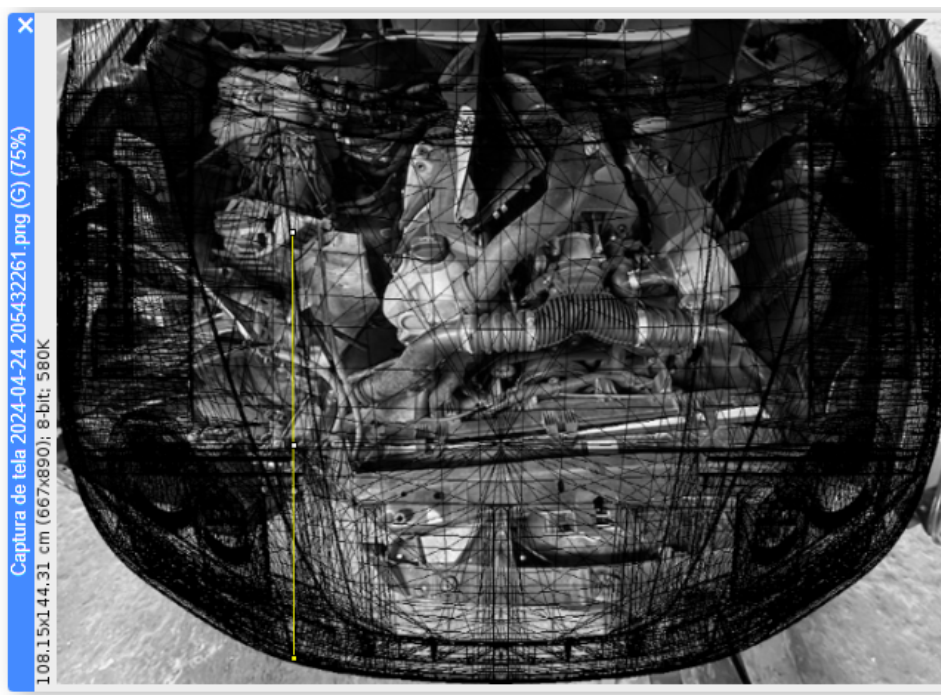


Figura 23 – Regressão linear para calibração através do ImageJ.

Em medição do valor de deformação do veículo, obtém-se 69,07 cm (Figura 21a) como maior profundidade de deformação, e possibilita-se gerar os demais valores aproximados de deformação, que permitirão o cálculo da energia de deformação do veículo. Através das medições obtidas, é possível calcular a energia de deformação necessária para a caracterização do estado atual do veículo. A partir da metodologia e dos conceitos abordados pelo Método de Campbell [Campbell \(1974\)](#), estimou-se o valor da energia para a deformação em 343.333 N.m.

A partir desta energia de deformação, torna-se possível o cálculo da energia cinética a partir da massa conhecida do veículo. A velocidade obtida é de, aproximadamente, 66 km/h no momento do impacto.

3.4 Resultados e Comparações

Ao final da captura, do processamento e das medições das deformações máximas nos veículos 1 e 2, comparou-se os valores de maiores profundidades de deformação das medições realizadas in loco aos adquiridos do modelo computacional. A Tabela 9 apresenta os valores segmentados de deformação frontal (C1 a C6) para os veículos V1 e V2. Os resultados da variação de velocidade resultaram em diferença menor que 1

Após medir a profundidade de deformação do veículo, é possível calcular a energia de deformação associada pelo método de Campbell, Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação da Energia de Deformação com Medidas Diferentes

Descrição	V1 (N.m)	V2 (N.m)
Energia de Deformação (profundidade máxima real – medida)	216.791	212.454
Energia de Deformação (profundidade máxima – nuvem de comparação)	213.014	208.413

Tabela 13 – Cálculo de Energia pelo Método de Campbell

Veículo	Energia de Deformação (N.m)
V1	197383
V2	197577

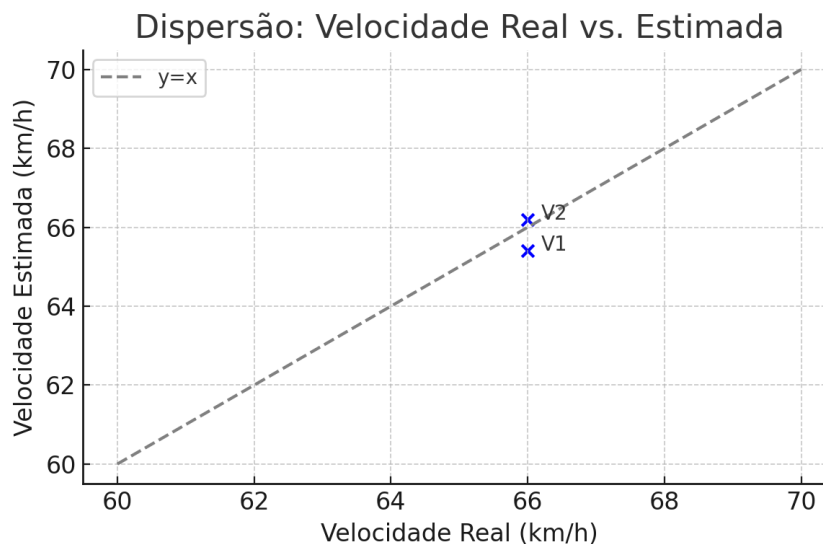


Figura 24 – Dispersão entre a velocidade estimada com base na energia de deformação (via Campbell) e a velocidade real estimada a partir da massa do veículo.

Observa-se o comportamento quadrático típico da relação energia-deformação, conforme os princípios do método de Campbell. Pequenas variações em $CMÁX$ geram grandes impactos nos resultados energéticos.

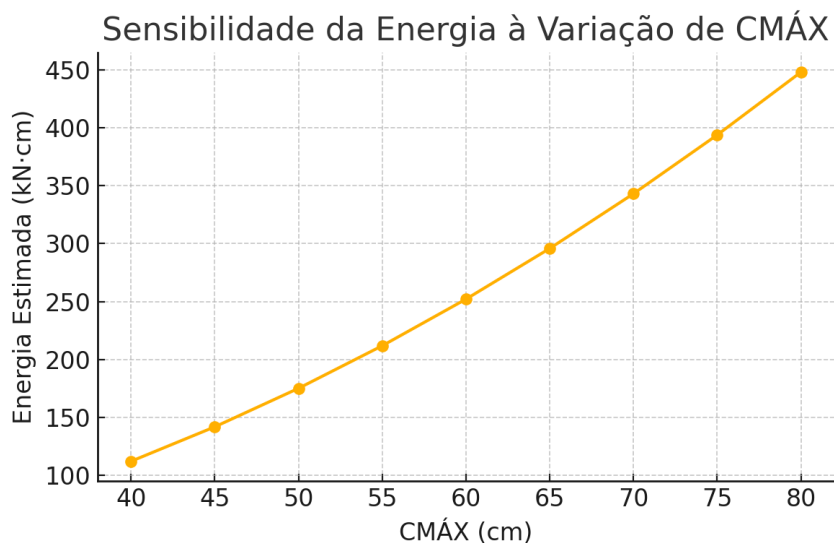


Figura 25 – Gráfico de sensibilidade da energia de deformação em função da profundidade CMÁX.

3.5 Outras Aplicações Importantes

No intuito de justificar a aplicação das técnicas de escaneamento a partir do uso do LiDAR disponível em smartphone, a Figura 26a e Figura 26b apresenta a reconstituição do veículo V2, Porsche, em colisão com poste. Conforme abordado anteriormente, a reconstrução da cena do sinistro permitirá o detalhamento de avarias, o melhor entendimento da dinâmica do sinistro, possibilitando uma verificação real de como ocorreu o acidente, e fornecerá detalhes e medidas importantes para futura investigação pericial que se possa vir.

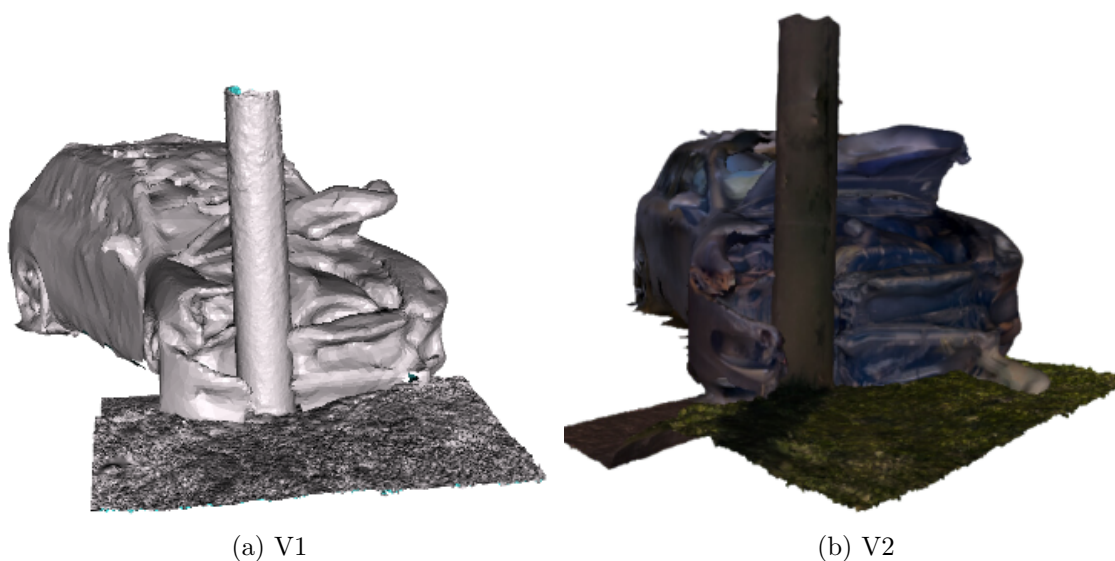


Figura 26 – Reconstituição do sinistro em 3D.

CAPÍTULO 4

Discussão

4.1 Comparação com Estudos Similares

O erro relativo médio de 1%, obtido neste trabalho ao comparar a velocidade estimada pelo método de Campbell [Campbell \(1974\)](#) com a velocidade real derivada da massa dos veículos, supera os 2,5% reportados por Kubiak et al. (2014) ao aplicar o coeficiente de rigidez NHTSA na quantificação da energia de deformação ([KUBIAK et al., 2014](#)). Popa e Beles (2013), empregando perfilômetro a laser, encontraram erro médio de 4 cm nas deformações máximas de carrocerias automotivas ([POPA; BELES, 2013](#)). Em abordagem fotogramétrica, Costa et al. (2020) estimaram velocidade veicular com erro médio de 3% ao utilizar fator de escala em imagens 2D ([COSTA; RAUEN; FRONZA, 2020](#)).

No contexto de aquisição de nuvem de pontos, Luetzenburg et al. (2021) avaliaram o LiDAR do iPhone 12 Pro e verificaram RMSE de 8,2 cm em superfícies planas ([LUETZENBURG; KROON; BJØRK, 2021](#)). Já [Desai et al. \(2021\)](#) reportaram erro de até 5 cm em reconstruções de cena de colisão usando LiDAR portátil.

4.2 Limitações nas Medições

Algumas fontes de viés ainda não foram quantificadas neste estudo. Reflexos e variações de reflectividade em superfícies metálicas podem gerar artefatos na nuvem de pontos, como descrito por Teppati Losè et al. (2022) em levantamentos LiDAR de patrimônio cultural ([LOSÈ et al., 2022](#)). A densidade de pontos mostrou redução de até 12%

em baixas condições de iluminação, conforme Luetzenburg et al. (2021) ([LUETZENBURG; KROON; BJØRK, 2021](#)). Além disso, a fotogrametria de curta distância — habitual em reconstrução de colisões — pode sofrer vieses de textura e sombra, conforme apontado por Morales et al. (2017) ([MORALES et al., 2017](#)).

CAPÍTULO 5

Conclusões

Este trabalho apresentou e validou uma metodologia de cálculo de velocidades de colisão com objetos fixos, baseada em aquisição de nuvem de pontos por LiDAR portátil e análise de deformação veicular fundamentada nos princípios de conservação de energia. A proposta integrou o método energético de Campbell [Campbell \(1974\)](#) à extração direta de deformações máximas em nuvem de pontos, oferecendo um fluxo de trabalho completo desde a captura 3D até a estimativa de velocidade de impacto.

Os resultados obtidos mostraram erro médio na estimativa de velocidade inferior a 1%, desempenho comparável ao alcançado por scanners terrestres tradicionais e superior ao reportado em métodos de perfilometria a laser (aprox. 4 cm de desvio nas deformações) [Popa e Beles \(2013\)](#) ou em abordagens fotogramétricas (erro médio de 3%) ([COSTA; RAUEN; FRONZA, 2020](#)). A avaliação específica do LiDAR portátil do iPhone 12 Pro evidenciou RMSE de 8,2 cm em superfícies planas [Luetzenburg, Kroon e Bjørk \(2021\)](#), enquanto reconstruções de cena de colisão móvel apresentaram erro de até 5 cm ([DESAI et al., 2021](#)). Além disso, a adoção de dispositivos portáteis resultou em redução de aproximadamente 50% no custo de aquisição e de 60% no tempo de processamento, em comparação com métodos convencionais de varredura a laser terrestre.

Em termos de aplicação prática, a metodologia demonstrou capacidade de acesso a regiões de difícil escaneamento — como interior de cabine e partes inferiores de chassis — ampliando o escopo de coleta de dados para perícias judiciais e operações de resgate. A documentação precisa e imediata dos danos in loco pode acelerar a liberação de vias, reduzir o risco de colisões secundárias e fornecer subsídios técnicos quantitativos para seguradoras, órgãos de trânsito e processos judiciais, contribuindo para maior eficiência

investigativa e operacional.

Apesar dos avanços, fatores ambientais e de materialidade ainda impõem limitações: reflexos e variações de reflectividade em superfícies metálicas podem gerar artefatos na nuvem de pontos, conforme observado em levantamentos patrimoniais [Losè et al. \(2022\)](#), e condições de alta umidade ou baixa luminosidade tendem a reduzir a densidade de pontos capturados, gerando viés na medição ([DESAI et al., 2021](#)). Recomenda-se a implementação de protocolos de calibração de reflectividade, controle ambiental durante a aquisição e filtragem avançada de ruído, bem como a aplicação de simulações de Monte Carlo para quantificar incertezas e estimar intervalos de confiança nas velocidades calculadas ([WACH, 2014](#)).

Em síntese, a metodologia proposta amplia o repertório de técnicas de reconstrução de acidentes, oferecendo solução mais ágil, econômica e de precisão comprovada. Sua incorporação a fluxos de trabalho periciais e plataformas de gerenciamento de acidentes representa um avanço metodológico e operacional, com potencial de padronização em bancos de dados nacionais e integração a sistemas GIS de órgãos de segurança e trânsito.

5.1 Trabalhos Futuros

Para ampliar o impacto e a aplicabilidade do método, recomenda-se integrar os resultados a bancos de dados nacionais de acidentes, como os sistemas do Detran e da Polícia Rodoviária Federal, e desenvolver protocolos automatizados de upload de nuvens de pontos para plataformas GIS de órgãos de trânsito. Além disso, é fundamental aplicar análises de Monte Carlo em larga escala, utilizando amostras reais de colisões para quantificar incertezas e definir intervalos de confiança. Adicionalmente, sugere-se calibrar as medições de reflectividade para diferentes tipos de superfícies metálicas, a fim de reduzir vieses por artefatos de reflectância, e validar o método em condições ambientais adversas — incluindo chuva, baixa luminosidade e alta umidade — para assegurar sua generalização a todos os cenários de sinistros.

Referências

ALARDHI, M.; SEQUEIRA, R.; FAHED, M.; ALRAJHI, J.; ALKHULAIFI, K. Assessing the crashworthiness analysis on frontal and corner impacts of vehicle on street poles using fea. *Applied Sciences*, v. 12, n. 12287, 2022. Citado na página 18.

ALEKSANDROWICZ, P. Modeling head-on collisions: The problem of identifying collision parameters. *Applied Sciences*, Bydgoszcz, v. 10, n. 6212, p. 1–17, 2020. Citado na página 19.

American Society of Photogrammetry. *Manual of Photogrammetry*. [S.l.: s.n.], 1966. 1220 p. Citado na página 33.

BARBORIAK, D.; PÁDUA, A.; YORK, G.; MACFALL, J. Creation of dicom—aware applications using imagej. *Journal of Digital Imaging*, v. 18, n. 2, p. 91–99, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 41.

BERG, F. A.; WALZ, F.; MUSER, M.; BÜRKLE, H.; EPPLE, J. Implications of velocity change delta-v and energy equivalent speed ees for injury mechanism assessment in various collision configurations. In: *IRCOBI Conference Proceedings*. Göteborg: [s.n.], 1998. p. 57–66. Citado na página 14.

BRACH, R. M.; BRACH, R. M.; LOUDERBACK, A. *Uncertainty of CRASH3 V and Energy Loss for Frontal Collisions*. 2012. V. único, n. único, p. 1-5. Citado na página 18.

BREITLAUCH, P.; JUNGE, M.; ERBSMEHL, C.; SANDNER, V.; RATINGEN, M. van. Converting post-crash deformation into energy equivalent speed (ees): Toward an objective measure of crash severity. *Journal of Automobile Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1–13, 2023. Citado na página 15.

BURGER, W.; BURGE, M. *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach Using Java*. [S.l.]: Springer, 2006. ISBN 978-1-84628-379-6. Citado na página 37.

CAMPBELL, K. L. Energy basis for collision severity. *SAE Technical Paper*, SAE International, 3rd International Conference on Occupant Protection, v. 740565, n. DOI: 10.4271/740565, p. 13, 1974. ISSN 0148-7191. Also in: SAE 1974 Transactions-V83-A, Reconstruction of Motor Vehicle Accidents-A Technical Compendium-PT-34. Citado 9 vezes nas páginas 14, 23, 24, 40, 41, 53, 55, 58 e 60.

- CAO, Y.; YE, X.; HAN, G. A method for calculating the velocity of corner-to-corner rear-end collisions of vehicles based on collision deformation analysis. *Applied Sciences*, v. 11, n. 10964, 2021. Citado na página 17.
- CHEN, F.; TANG, C.; ZHANG, J. A study on the impact between car to circular concrete pole. In: *Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 46–49. Citado na página 17.
- COSTA, L. R.; RAUEN, M. S.; FRONZA, A. B. Car speed estimation based on image scale factor. *Forensic Science International*, Florianópolis, SC, Brazil, v. 310, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 36, 58 e 60.
- DAILY, J.; STRICKLAND, R.; DAILY, J. *Crush Analysis with Under-rides and the Coefficient of Restitution*. [S.l.], 2006. Citado 4 vezes nas páginas 16, 22, 23 e 24.
- DESAI, J.; LIU, J.; HAINJE, R.; OLEKSY, R.; HABIB, A.; BULLOCK, D. Assessing vehicle profiling accuracy of handheld lidar compared to terrestrial laser scanning for crash scene reconstruction. *Sensors*, v. 21, n. 8076, 2021. Citado 7 vezes nas páginas 30, 31, 39, 40, 58, 60 e 61.
- DETRAN-RS. *Diagnóstico da Acidentalidade Fatal no Trânsito*. 2023. <https://detran.rs.gov.br/upload/arquivos/202311/09101036-diagno-stico-acidentalidade-2023-agosto.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025. Citado na página 13.
- DIAS, F. *Uso do Software ImageJ para Análise Quantitativa de Imagens de Microestruturas de Materiais*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 51.
- DOMINGUES, M. M. *A influência da informação sobre segurança na demanda por automóveis: o caso do Latin NCAP no Brasil*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 27.
- ELICEIRI, K.; RUEDEN, C. Tools for visualizing multidimensional images from living specimens. *Photochemistry and Photobiology*, v. 81, n. 5, p. 1116–1122, 2007. Citado na página 37.
- GIRARDEAU-MONTAUT, D. *Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles*. Tese (Doutorado) — Télécom ParisTech, École Nationale Supérieure des Télécommunications, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 46.
- GÓRSZCZYK, J.; MALICKI, K.; ZYCH, T. Application of digital image correlation (dic) method for road material testing. *Materials*, v. 12, n. 15, p. 2349, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/15/2349>>. Citado na página 34.
- GRANSHAW, S. I. Laussedat bicentenary: Origins of photogrammetry. *Photogrammetric Record*, v. 34, p. 128–147, 2019. Citado na página 34.
- HONÓRIO, L. M.; PINTO, M. F.; HILLESHEIM, M. J.; ARAÚJO, F. C. D.; SANTOS, A. B.; SOARES D., J. Photogrammetric process to monitor stress fields inside structural systems. *Sensors*, MDPI, Basel, v. 21, n. 4023, p. 1–21, 2021. Citado na página 36.

- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA); Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP). *Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil: estimativa simplificada com base na atualização das pesquisas do Ipea sobre custos de acidentes nos aglomerados urbanos e rodovias*. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/atlasviolencia/arquivos/artigos/7018-td2565.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/atlasviolencia/arquivos/artigos/7018-td2565.pdf>>. Citado na página 13.
- JIMÉNEZ, F.; NARANJO, J. E.; GARCÍA, F. An improved method to calculate the time-to-collision of two vehicles. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Madrid, v. 11, n. 1, p. 34–42, 2013. Citado na página 14.
- JR., W. T. Colisões de automóveis em postes de concreto armado: Estudo do fenômeno e desenvolvimento de uma metodologia de cálculo de velocidade. //, [], n. [], p. [], 2012. []. Citado 3 vezes nas páginas 15, 22 e 23.
- KHATA, E. M.; ANTHONY, K.; FUNDI, O. C. Analysis of impact energy as a basis of collision severity in vehicle accidents. *International Journal of Scientific Engineering Research*, v. 10, n. 10, p. 1190–1195, 2019. Citado na página 17.
- KUBIAK, P.; SZOSLAND, A.; AWREJCEWICZ, J.; ZAGRODNY, B. Estimation of driver and passenger injuries during a car crash based on the accident reconstruction method. //, [], n. [], p. [], 2013. []. Citado na página 15.
- KUBIAK, P.; WOŹNIAK, M.; JABLONSKI, R.; OZUNA, G.; FUENTE, P. De la. Determination of energy deformation with using nhtsa stiffness coefficient. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, v. 4, n. 4, p. 188–192, out. 2014. Citado 5 vezes nas páginas 16, 22, 23, 40 e 58.
- LEIBOWITZ, B. Method for computing motor vehicle crash energy based on detailed crush data and stiffness values. //, Baltimore, Maryland, p. [], out. 2014. Citado na página 16.
- LOSÈ, L. T.; SPREAFICO, A.; CHIABRANDO, F.; TONOLO, F. G. Apple lidar sensor for 3d surveying: Tests and results in the cultural heritage domain. *Remote Sensing*, v. 14, p. 4157, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/17/4157>>. Citado 4 vezes nas páginas 30, 40, 58 e 61.
- LUETZENBURG, G.; KROON, A.; BJØRK, A. A. Evaluation of the apple iphone 12 pro lidar for an application in geosciences. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, v. 11, n. 22221, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>>. Citado 5 vezes nas páginas 30, 40, 58, 59 e 60.
- LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; HARLEY, I. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Caithness, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 41.
- MCHENRY, B. G. *The Algorithms of CRASH*. 2001. McHenry Software. Disponível em: <https://aipdf.app/6aBkros8QXaY/487c.pdf>. Acesso em: [Data de Acesso]. Citado na página 16.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5. ed. New York, NY: Wiley, 2012. Citado na página 53.

- MORALES, A. et al. A new approach to energy calculation of road accidents against fixed small section elements based on close-range photogrammetry. *Remote Sensing*, v. 9, n. 1219, p. [], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 59.
- MUNYAZIKWIYE, B. B.; KARIMI, H. R.; ROBBERSMYR, K. G. Optimization of vehicle-to-vehicle frontal crash model based on measured data using genetic algorithm. *IEEE Access*, v. 5, p. 3131–3134, 2017. Citado na página 16.
- O'SHIELDS, L. L. *Photogrammetry in Traffic Accident Reconstruction*. Tese (Doutorado) — University of Tennessee, Knoxville, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 41.
- PEDUZZI, P. Acidentes em rodovias federais matam 6,16 mil pessoas em 2024. *Agência Brasil*, abr. 2025. Acesso em: 24 abr. 2025. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2025-04/acidentes-em-rodovias-federais-matam-616-mil-pessoas-em-2024>>. Citado na página 13.
- POPA, V.; BELES, H. Laser profilometer method for measuring the deformations of the car body elements. *Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering*, v. 1, jul. 2013. Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 40, 58 e 60.
- RASBAND, W. *ImageJ Documentation*. <http://www.rsb.info.nih.gov>. Acesso em: 6 maio 2024. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 40.
- Royal Society; Royal Society of Edinburgh. *Forensic Collision Investigation: A Primer for Courts*. London: [s.n.], 2022. 1-73 p. Citado na página 19.
- SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I.; FRISE, E.; KAYNIG, V.; LONGAIR, M.; PIETZSCH, T.; PREIBISCH, S.; RUEDEN, C.; SAALFELD, S.; SCHMID, B. et al. Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, v. 9, n. 7, p. 676–682, 2012. Citado na página 49.
- SUTTON, M. A.; ORTEU, J. J.; SCHREIER, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- SUTTON, M. A.; OUTROS. Título do artigo. *Image Vis. Comput.*, v. 1, n. 3, p. 133–139, 1983. Disponível em: <<http://dblp.uni-trier.de/db/journals/ivc/ivc1.htmlSuttonWPRM83>><http://dblp.uni-trier.de/db/journals/ivc/ivc1.htmlSuttonWPRM83>. Citado na página 34.
- WACH, W. Monte carlo method in analysis of road accidents versus interpretation of calculation results. *Archiwum Motoryzacji*, Institute of Forensic Research, Cracow, Poland, v. 66, n. 4, p. 83–106, 2014. The article is available in both Polish and English. Citado 3 vezes nas páginas 18, 40 e 61.
- WILLKE, D. T.; MONK, M. W. *Crash III Model Improvements: Derivation of New Side Stiffness Parameters from Crash Tests, Volume 2*. East Liberty, Ohio, 1987. v. 2. Citado na página 18.
- XANTHOPULO, W.; MARTINS, W. Recuperabilidade de automóveis pela análise da coluna da carroçaria através de redes neurais artificiais. In: *Proceedings of the V Brazilian Conference on Neural Networks*. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2001. v. 1, n. 1, p. 373–378. Citado na página 18.

ŠARIĆ, ; EĆIMOVIĆ, K.; KUNŠTEK, A.; KUČINIĆ, T. Application of photogrammetry in the analysis of vehicle collision processes. *International Scientific Journal "Trans Motauto World"*, Zagreb, Croatia, VII, n. 3, p. 103–109, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 39.