

APLICAÇÃO DE SMARTPHONES EQUIPADOS COM SENSOR LiDAR NA RECONSTRUÇÃO DE ACIDENTES: ANÁLISE DA VELOCIDADE DE COLISÃO

SMARTPHONES EQUIPPED WITH LiDAR SENSOR APPLICATION IN THE RECONSTRUCTION OF ACCIDENTS: COLLISION SPEED ANALYSIS

RESUMO

A aumento crescente de acidentes acompanha o crescimento de veículos em circulação no país. Entre as principais causas dos acidentes, está a velocidade incompatível que, embora tenha apresentado queda em sua recorrência nos sinistros, possui taxa de mortalidade que não segue tal padrão de decaimento. O excesso de velocidade é uma das principais causas de acidentes e mortes no trânsito no mundo. Neste cenário, avanços no cálculo da velocidade de colisão se tornam importantes ferramentas para a investigação forense. Este artigo tem como objetivo demonstrar o progresso alcançado no desenvolvimento de solução econômica e prática para estimativa da velocidade de colisão, calculada a partir do escaneamento 3D de sensores LiDAR comercializados em smartphones. A obtenção da profundidade das deformações e a aplicação de conceitos conhecidos de conservação da energia permitem estimar, com precisão, a velocidade de impacto nestas colisões. Dois estudos de casos forneceram dados para a validação da metodologia desenvolvida, resultando em erros inferiores a 1% quando comparado aos métodos de cálculos analíticos. Em suma, o escaneamento realizado por smartphones permite a documentação de danos do veículo no local do sinistro, além de reduzir a incerteza sobre o fato de a avaria ter ocorrido durante ou após o acidente.

Palavras-chave: *LiDAR; Reconstrução de acidentes, Velocidade de colisão; Acidentes de trânsito; Escaneamento de acidentes por smartphones.*

ABSTRACT

The increasing number of accidents accompanies the growth of vehicles in circulation in the country. Among the main causes of accidents, there is the incompatible speed which, although has shown a decrease in its recurrence in the accidents, has a mortality rate that does not follow such a pattern of decay. Excessive speed is one of the leading causes of traffic accidents and deaths worldwide. In this scenario, advances in collision speed calculation became important tools for forensic investigation. This article aims to demonstrate the progress achieved in the development of an economic and practical solution for estimating the collision velocity, calculated from the 3D scanning of LiDAR sensors commercialized in smartphones. Obtaining the depth of deformations and the application of known concepts of energy conservation allow for accurate estimation of the impact speed in these collisions. Two case studies provided data for the validation of the methodology developed, resulting in less than 1% errors when compared to analytical calculation methods. In sum, the scanning carried out by smartphones allows the documentation of vehicle damage at

the scene of the accident, in addition to reducing the uncertainty as to whether the breakdown occurred during or after the accident.

Keywords: LiDAR; Accident reconstruction; Collision speed; Traffic accident; Mobile laser scanning.

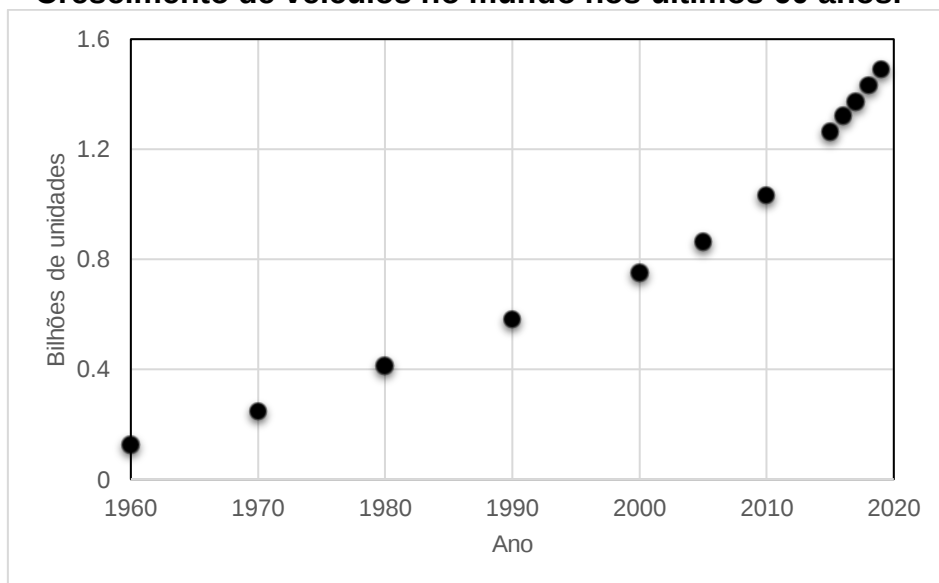
REALIZAÇÃO



1. INTRODUÇÃO

Estima-se que o número de veículos em circulação já ultrapassou 1,4 bilhão de unidades em todo o mundo. Considerando a exponencial de crescimento registrada nos últimos 60 anos, Figura 1, cuja quantidade dobra a cada 20 anos, espera-se cerca de 2,38 bilhões de veículos poderão estar nas ruas em 2030 no mundo (OICA, 2021; WORLD BANK, 2021; STATISTA, 2021).

Figura 1 – Crescimento de veículos no mundo nos últimos 60 anos.



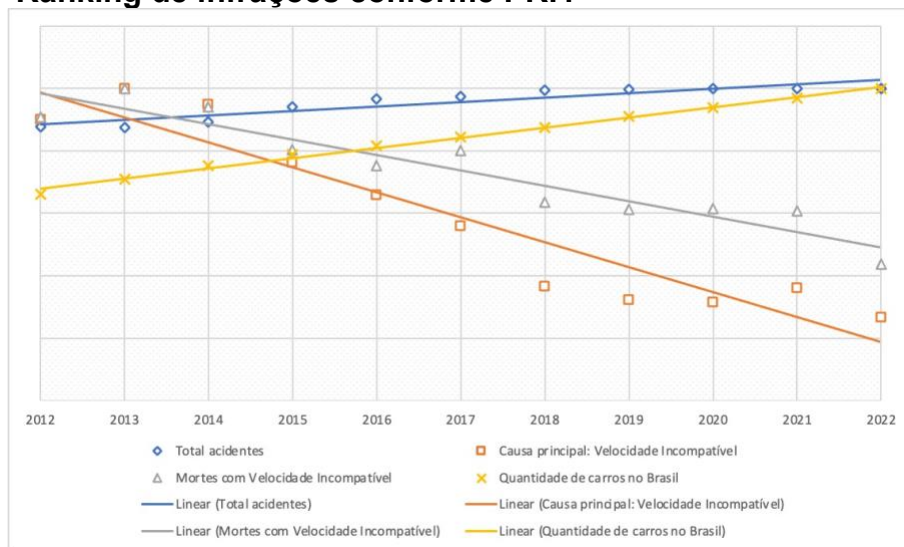
Fonte: (OICA, 2021; WORLD BANK, 2021; STATISTA, 2021).

Se por um lado o Brasil tem acompanhado o ritmo de crescimento mundial, o elevado quantitativo de veículos nas ruas gera diversas consequências socioambientais, principalmente, ao que se diz respeito do aumento dos acidentes de trânsito.

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT), os acidentes e mortes nas rodovias federais custaram ao país quase R\$ 13 bilhões em 2022. O total de registros de acidentes nas rodovias federais em 2022 foi de 64.447, sendo que 52.948 deles acabaram com vítimas (mortos ou feridos). Figuram-se entre os principais tipos de acidentes, no ano de 2022: a colisão (60%), a saída de pista (15,2%) e capotamento/tombamento (11,8%).

A partir da análise dos dados históricos de acidentes de trânsito da Polícia Rodoviária Federal (PRF) de 2012 a 2022, a Figura 2 apresenta as curvas normatizadas da evolução de veículos no Brasil (IBGE, 2022), a evolução do número de acidentes em estradas federais, os acidentes cuja causa da colisão foi a velocidade incompatível e a quantidade de acidentes graves com mortos.

Figura 2 – Ranking de infrações conforme PRF.

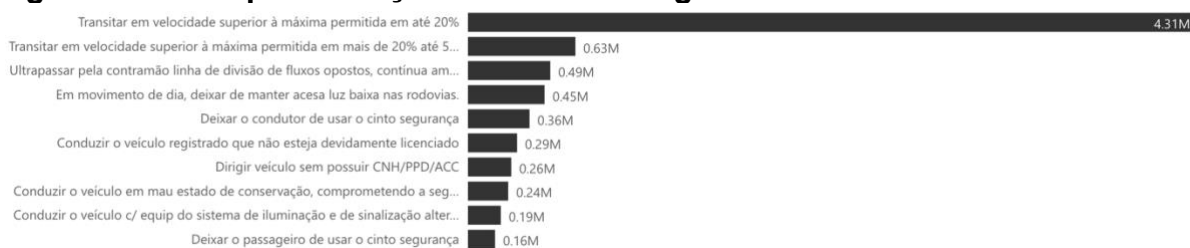


Fonte: PRF (2023) e IBGE (2022).

O crescimento acelerado do número de acidentes possui relação direta com o número crescente de veículos em circulação. Embora os registros de acidentes provocados por velocidade incompatível apresentem queda recorrente, a quantidade de vidas perdidas não acompanha o mesmo decaimento.

A Figura 3 revela outro dado alarmante, o número de infrações relacionadas ao excesso de velocidade, registradas pela PRF em 2022, são significativamente superiores às demais infrações, colocando em evidência a discussão das relações entre a velocidade incompatível e os acidentes.

Figura 3 – Principais infrações de trânsito registradas em 2022.



Fonte: (PRF, 2023).

A velocidade incompatível ainda é uma das principais causas de acidentes e mortes no mundo (WHO, 2019). Neste sentido, considerando o crescimento proporcional do número de acidentes com o número de veículos, o estudo da velocidade de colisão dos veículos é um pilar fundamental para que a engenharia forense forneça ferramentas de investigação apropriadas, permitindo a reconstrução de acidentes e o entendimento da dinâmica do sinistro.

Neste sentido, o cálculo da velocidade de colisão se torna importante ferramenta para a investigação de sinistros. Este artigo tem como objetivo demonstrar o progresso alcançado no desenvolvimento de solução econômica, a partir do

escaneamento 3D, para capturar informações de colisões de veículos e possibilitar a reconstrução do acidente, além de permitir a extração de informações adicionais como volume e profundidade das deformações. Trata-se de ferramenta para auxiliar as estimativas já realizadas por peritos e gerar respaldo e validação técnica dos resultados.

Entretanto, embora já existam disponíveis no mercado soluções de mapeamento 3D utilizadas para a representação de veículos, o valor destes equipamentos, frequentemente na ordem de centenas de milhares de reais, é um fator impeditivo para a ampla disseminação do uso dessas técnicas. Esses equipamentos geralmente são restritos a grandes empresas privadas ou consultorias de maior porte, o que impede que usuários externos tenham acesso a eles. Isso é um obstáculo para a documentação de sinistros de trânsito por parte de profissionais que não possuam recursos ou acesso aos equipamentos tradicionais. Um equipamento de baixo custo, portátil e simples permitiria que profissionais digitalizassem superfícies, ambientes e partes específicas de um acidente para que o estudo detalhado pudesse ser realizado.

A motivação desta pesquisa é apresentar a aplicabilidade dos sensores LiDAR, presentes em smartphones e tablets, para realizar a reconstrução 3D de um veículo com tempos de varredura significativamente curtos, o que permite o registro no local do sinistro sem que os veículos sejam movidos, capturando evidências o mais fidedignas possíveis do incidente original.

Em complemento à técnica de escaneamento utilizada e da nuvem de pontos gerada, foi possível comparar modelos avariados com modelos originais e estabelecer, assim, diferença de volumes de deformações que, transformados em energia pelas equações de Campbell (1974), permitem a estimativa da velocidade de danos destes veículos. Além do desenvolvimento da técnica, dois casos serão apresentados para validação do método.

1.1 Análise da velocidade de impacto

1.1.1 Variáveis de deformação no veículo

A análise utiliza o Princípio do Trabalho e Energia, que – a partir da determinação do deslocamento do centro de gravidade do automóvel, desde o início da colisão com o objeto até a sua parada – determina o trabalho realizado e a energia cinética equivalente através das forças de atrito entre as rodas do veículo e o pavimento.

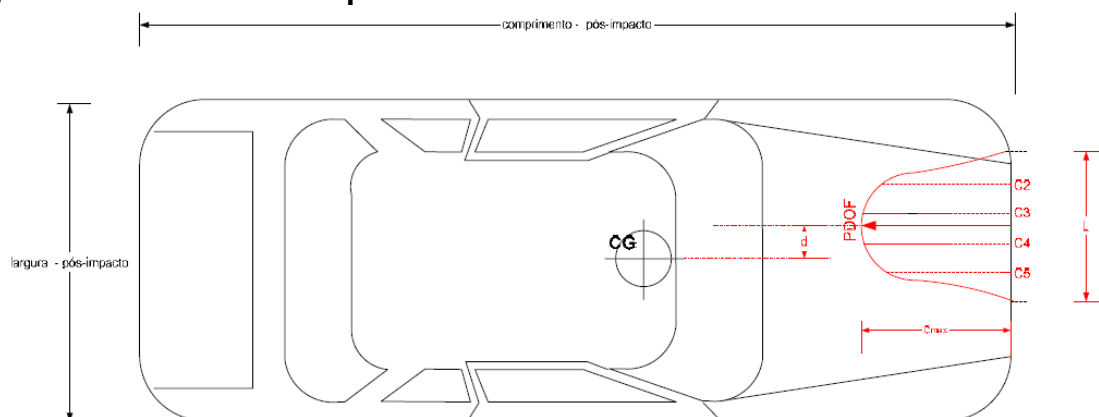
As colisões frontais e laterais de automóveis em objetos fixos dependem de algumas variáveis (TORESAN, 2010), apresentadas pela Tabela 1 e descritas graficamente na Figura 3. Trata-se de deformações em porções frontais e laterais do veículo.

Tabela 1 – Variáveis relacionadas às colisões frontais e laterais de veículos com barreira do tipo objeto.

CG	centro de gravidade
L	largura da área deformada
C _{MAX}	cota de máxima deformação
C _n e C _{gn}	cotas locais e globais de deformação medidas ao longo de “L”
PDOF	força de colisão com o objeto
d	distância entre a linha de ação da PDOF e a linha paralela que cruza o centro de gravidade do automóvel
L _{pós}	largura e comprimento do veículo pós-impacto

Fonte: (DAILY; STRICKLAND; 2006).

Figura 4 – Variáveis de impacto.

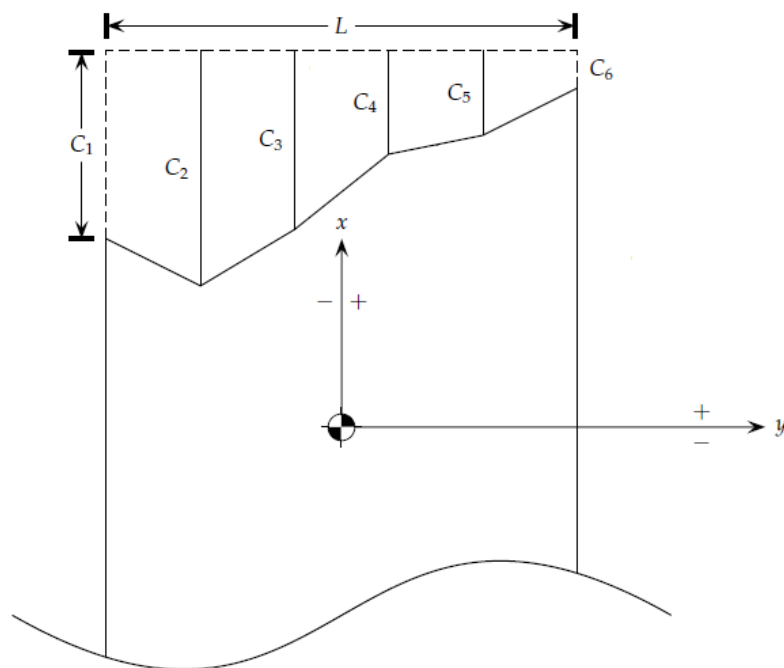


Fonte: (DAILY; STRICKLAND; 2006).

O método escolhido para compreensão deste evento foi o do **Método de Campbell**, o qual 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) (Figura 4) da região colidida do veículo. Conforme Equação 1, a fórmula para o cálculo da energia de esmagamento é relacionada pelas áreas de danos e pelo coeficiente, já pré-definidos.

$$E_T = \frac{L}{5} \left(\frac{Ax_1}{2} + \frac{B(x_2+x_3)}{6} + \frac{5A^2}{2B} \right) \quad (1)$$

Figura 5 – Zonas de danos conforme método de Campbell



Fonte: Campbell (1974).

Onde:

$$x_1 = C_1 + 2C_2 + 2C_3 + 2C_4 + 2C_5 + C_6 \quad (2)$$

$$x_2 = C_1^2 + 2C_2^2 + 2C_3^2 + 2C_4^2 + 2C_5^2 + C_6^2 \quad (3)$$

$$x_3 = C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_4 + C_4C_5 + C_5C_6 \quad (4)$$

Onde:

Tabela 2 – Variáveis da equação.

A	N/m (tabelado, valor experimental)
B	N/m ² (tabelado, valor experimental)
C	m (cotas de deformações do veículo)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

1.2 Crash test

Os testes de segurança nos veículos comercializados são realizados por entidades especializadas que avaliam qual a segurança do veículo em colisões frontais e laterais em velocidades padrões e especificadas. O primeiro *crash test* realizado foi desenvolvido, em 1934, pela *General Motors*, sendo este uma iniciativa independente realizada pela montadora.

No Brasil, os testes seguidos são estudados e analisados pela *Latin NCAP*, a qual realiza os *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).

1.3 LiDAR

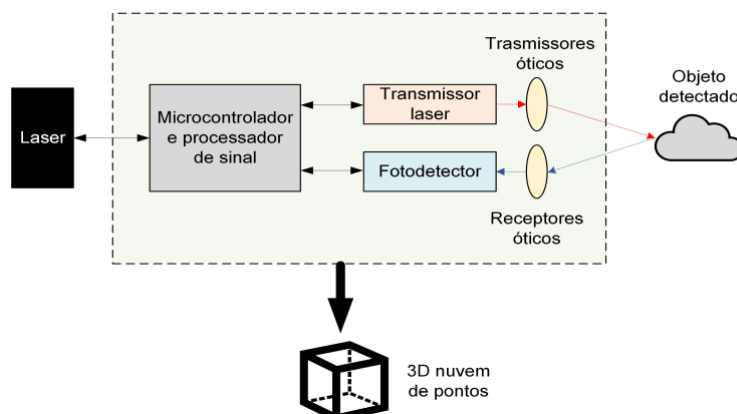
O sensor *Light Detection and Ranging* (LiDAR) utiliza um feixe de luz laser para medir a distância e a posição de objetos no ambiente circundante. A técnica envolvida é chamada de "escaneamento a laser" ou "varredura a laser". O princípio físico subjacente é o tempo de voo, que mede o tempo que a luz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

O LiDAR funciona escaneando seu campo de visão (FoV) com um ou vários feixes de laser e representa um método para determinar a distância de um objeto a partir do transmissor de sinal a laser. O sistema de varredura direciona feixes de laser em diferentes ângulos horizontais e verticais. A luz transmitida, ou seja, o sinal óptico do laser cuja intensidade, fase ou frequência de forma de onda foi modulada, é refletida de uma superfície, objeto ou partícula. O sinal então retorna ao receptor, onde a distância é calculada com base no tempo de voo (ToF), ou seja, o tempo necessário para o sinal refletido retornar ao receptor. A se tratar de um sinal óptico, as leis da óptica geométrica se aplicam, portanto, dependendo do meio de transmissão, a velocidade de propagação do sinal óptico é próxima à velocidade da luz (LOPAC et al., 2022).

Além disso, o comprimento de onda é normalmente alterado durante a transmissão para que o dispositivo reconheça o sinal transmitido ou recebido. A lente óptica do receptor atua como um telescópio e foca o sinal óptico refletido no fotodetector, que converte os fótons coletados que retornam do ambiente em sinal eletrônico, usando o efeito fotoelétrico (LOPAC et al., 2022).

Depois disso, o sinal é filtrado de acordo com as características variáveis de saída/entrada e processado para análise ou armazenamento adicionais. As técnicas de processamento de sinal são usadas para levar em conta as diferenças na energia refletida causadas pelos materiais de superfície e pelo ambiente entre o transmissor e o receptor. Finalmente, as saídas do lidar contêm nuvens de pontos tridimensionais (3D), correspondendo ao ambiente escaneado e intensidades correspondentes às energias a laser refletidas.

Figura 6 – Princípio de funcionamento do sensor LiDAR.



Fonte: Adaptado de Lopac et al. (2022).

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 do sensor LiDAR pode ser comparado, superficialmente, ao 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.

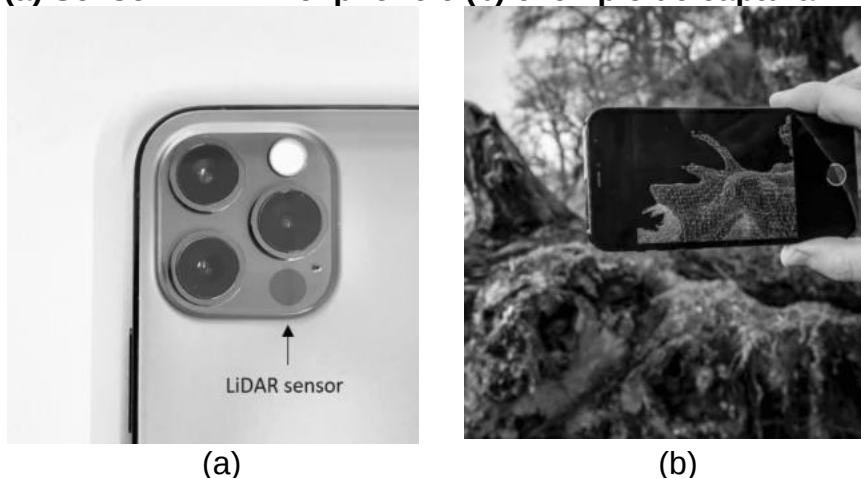
1.3.1 LiDAR em aparelhos telefônicos

Um dos primeiros dispositivos a apresentar uma tecnologia semelhante ao LiDAR foi o *Project Tango*, 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 o mapeamento em 3D e para a realidade aumentada. A partir daí, várias empresas, como a Samsung e a própria Apple, começaram a implementar sensores LiDAR em seus smartphones de alta qualidade (Figura 7).

Figura 7 – (a) Sensor LiDAR no Iphone e (b) exemplo de captura.



Fonte: Luetzenburg et al. (2021).

1.3.2 LiDAR iPhone versus outros dispositivos de captura

O nível de precisão e erro nas medições com o sensor LiDAR pode variar dependendo do modelo do dispositivo, das condições de iluminação e do ambiente em que a medição está sendo feita. No caso dos iPhones e iPads mais recentes com scanner LiDAR, a precisão é geralmente alta, com uma margem de erro de cerca de alguns centímetros (LUETZENBURG et al., 2022).

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 iPhones e iPads seja geralmente alto, é importante lembrar que as medições com esse tipo de sensor podem ser afetadas por uma variedade de fatores externos. Recomenda-se evitar a luz solar direta ou reflexos brilhantes que podem interferir no desempenho da captura. Além disso, superfícies reflexivas, tais como espelhos ou superfícies de metal brilhantes, devem ser evitadas ou cobertas, pois podem refletir a luz do laser e produzir resultados imprecisos.

Luetzenburg et al. (2021) testou pequenos objetos com dimensões conhecidas que foram digitalizados para testar a exatidão e precisão do sensor LiDAR. Modelos independentes de um penhasco costeiro foram adquiridos com o *3d Scanner App*, utilizando o sensor LiDAR do iPhone via fotogrametria *SfM MVS*, e com o aplicativo *EveryPoint*, combinando o LiDAR do iPhone e as fotos da câmera do iPhone. Os modelos LiDAR foram alinhados aos modelos de referência *SfM MVS*, e as distâncias entre as nuvens de pontos foram analisadas. GCPs foram usados para alinhamento do modelo, e o registro fino foi realizado no *CloudCompare*, sem alteração da escala dos modelos. A precisão do modelo in-situ foi testada pela comparação de nuvens modelo a modelo multiescala26 (M3C2) entre as nuvens de pontos LiDAR, entre as nuvens de pontos de referência *SfM MVS* e entre as nuvens de pontos *EveryPoint*. A

precisão foi testada comparando vários modelos de iPhone 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 *time-of-flight* (ToF). Esses dispositivos são tipicamente caracterizados por alguns milhares de pixels, por uma faixa de medição inequívoca máxima de até trinta metros e por pequenas dimensões. Dentre 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 ToF geralmente fornecem uma imagem de alcance e 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, o sinal modulado refletido e a luz de fundo da cena observada. Esses sensores têm sido empregados com sucesso para documentação 3D, apresentando resultados satisfatórios em termos de produtos e de precisão relacionada. Atualmente, as principais aplicações das câmeras ToF estão relacionadas à navegação de robôs, à segurança, ao monitoramento e à logística (TEPPATI LOSÈ et al., 2022).

1.3.3 Custo-benefício do LiDAR do iPhone versus precisão

Desai et al. (2021), utilizando escaneamento de veículo por sensor portátil LiDAR pelo smartphone, concluiu que a média do erro máximo (RMSE) obtido da distância do perfil entre varreduras portáteis e entre outros equipamentos com tecnologia *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), para um veículo danificado, foi da ordem de 3 cm (nível de precisão provavelmente suficiente e aceitável para a maioria estudos forenses). Esse nível de precisão é suficiente para a reconstrução da cena do acidente, pois é semelhante ao erro de medição da tecnologia usada atualmente.

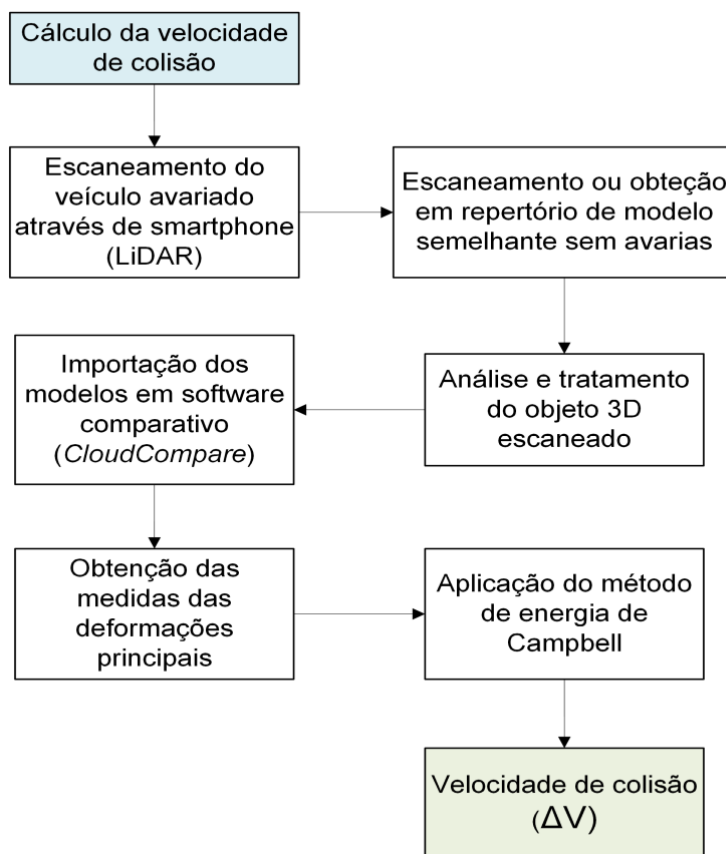
2. METODOLOGIA

A velocidade com que um automóvel se desloca é um aspecto crucial frequentemente levado em consideração nas investigações e debates judiciais sobre a causa de colisões no tráfego. Há um questionamento constante sobre o valor da velocidade no contexto da aplicação da lei.

Para a determinação da velocidade de colisão de um veículo a partir da reconstrução do acidente, este trabalho partiu do escaneamento 3D do veículo, utilizando um smartphone comercial com a tecnologia LiDAR. A partir da técnica de escaneamento utilizada e da nuvem de pontos gerada, foi possível comparar modelos avariados com modelos originais e estabelecer diferença de volumes de deformações, que transformados em energia pelas equações de Campbell (1974), permitem a

estimativa da velocidade de danos destes veículos. A metodologia pode ser entendida a partir do fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Metodologia para cálculo da velocidade de colisão a partir do escaneamento 3D por smartphone com tecnologia LiDAR.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

2.1 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 que serão utilizados para processar os dados obtidos. Os princípios físicos mais comuns que são empregados no processamento dos dados coletados em locais de acidentes no trânsito, a fim de calcular as velocidades dos veículos, baseiam-se – predominantemente – nos Princípios da Mecânica Newtoniana para Corpos Rígidos e, mais recentemente, na Mecânica dos Corpos Deformáveis, por meio de métodos analíticos ou computacionais. Embora ainda escassos, bancos de dados com valores experimentais sobre o comportamento de veículos em situações que simulam as variáveis presentes em acidentes começam a crescer em quantidade e qualidade.

A Tabela 3 apresenta os principais métodos de determinação de velocidade de colisão. Os métodos que serão utilizados para o desenvolvimento deste trabalho será o cálculo de velocidade de colisão a partir das equações de conservação de energia.

Tabela 3 - Métodos de determinação da velocidade de colisão.

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Análise da cena do acidente	Investigação da cena do acidente, incluindo a avaliação dos danos aos veículos envolvidos e a 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	- 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;

	velocidade de impacto.	de	
Simulação computacional	Utilização de programas de simulação para reconstruir a dinâmica do acidente e determinar a velocidade de impacto.	de dados sobre a velocidade de impacto e cenários complexos;	- Pode fornecer dados precisos a demorado, além de depender de uma modelagem precisa do acidente, que pode ser afetada por variáveis desconhecidas ou incertas;

Fonte: Elaborado pelos Autores.

2.2 Escaneamento do objeto

Conforme descrito por Cheng et al. (1998), a reconstrução de uma superfície 3D requer quatro etapas principais: aquisição de dados, registro, fusão e otimização. Na primeira etapa, é feita a aquisição de imagens da superfície a partir de vários pontos de vista do objeto. Em seguida, os pontos de vista são registrados ou transformados em um objeto comum. Na fase de fusão, todas as visões são combinadas em uma única superfície. Caso a aquisição envolva apenas um ponto de vista, as etapas de registro e fusão podem ser dispensadas. Na fase final, a otimização é realizada com o objetivo de aprimorar o formato para as tarefas de análise.

A Tabela 4 ilustra os principais métodos de escaneamentos 3D disponíveis. Para o presente estudo, utilizou-se a tecnologia de sensores LiDAR disponível em aparelhos smartphones e tablets.

Tabela 4 - Métodos de escaneamento 3D.

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, (1960)	Smith (1984)
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.	Fischler (1981)
Escaneamento por fotogrametria	Tira várias fotos de diferentes ângulos	1849	Laussedat, A.	Granshaw (2019)

	do objeto e as combina para criar um modelo 3D.			
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.	1963	Cormack, A. M.	Cormack (1963)
Escaneamento por ultrassom	Usa ondas sonoras de alta frequência para medir a distância entre o scanner e o objeto que está sendo escaneado.	1946	Firestone, F. A. e Peters, J. E.	Firestone (1946)
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..	Dorji et al. (2021)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Neste artigo, é realizado o escaneamento 3D do veículo após colisão, juntamente com as técnicas computacionais de análise de nuvem e a distância entre estes pontos, utilizando um sensor de fácil acesso como o LIDAR presente em um smartphone comercial. Essas técnicas são analisadas tanto de forma teórica quanto experimental para calcular a velocidade de colisão em veículos envolvidos em acidentes de trânsito.

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 9.

Figura 9 – Aparelho para estabilização e luz do escaneamento.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

3.2 Estudo de caso dos veículos

A validação da metodologia foi realizada a partir do estudo de caso de dois acidentes de colisão frontal em veículos descritos na Tabela 5 e Figura 10.

Tabela 5 – Veículos analisados.

Veículo	Tipo de colisão	Denominação
Citroen C4 Pallas 2009	Colisão frontal com árvore	V1
Porsche Cayenne 2011	Colisão frontal com poste	V2

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 10 – Vista dos veículos após colisão frontal com objeto fixo (a) V1 e (b) V2.



(a)

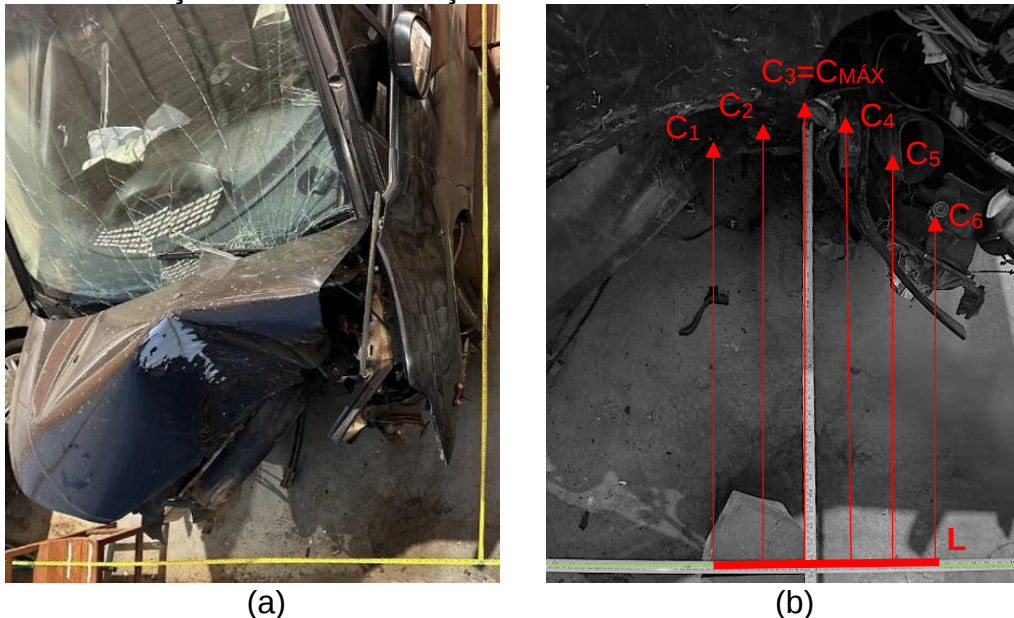


(b)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A análise de V1, conforme Figura 11, partiu da vistoria do veículo após colisão, seguido das medições das deformações.

Figura 11 – Medições das deformações C_n no veículo V1.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

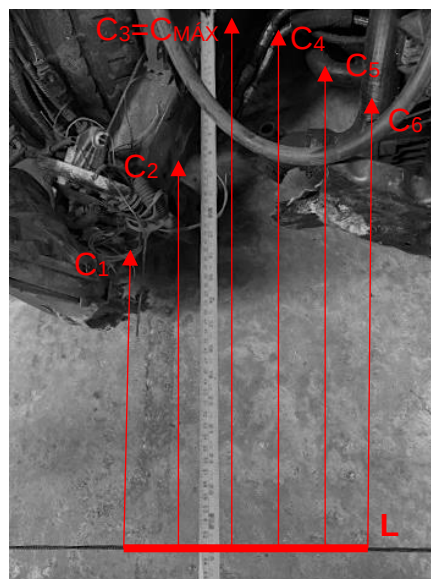
Com o auxílio de uma escala métrica, mensurou-se que o veículo V1 teve maior profundidade de deformação medida ($C_{MÁX}$), de 70 cm, ponto de maior profundidade que se refere ao ponto mais profundo no qual a árvore atingiu.

Para o veículo V2, a maior profundidade de deformação medida ($C_{MÁX}$) foi de 63 cm, conforme Figura 11, onde é mensurado a maior profundidade ao qual o poste de concreto atingiu.

Figura 11 – Medições das deformações C_n no veículo V2.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Com o auxílio de um smartphone equipado com o sensor LiDAR e do dispositivo de captura (Figura 9), 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 12.

Figura 12 - Escaneamento 3D dos veículos utilizando o sensor LiDAR (a) V1 e (b) V2.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

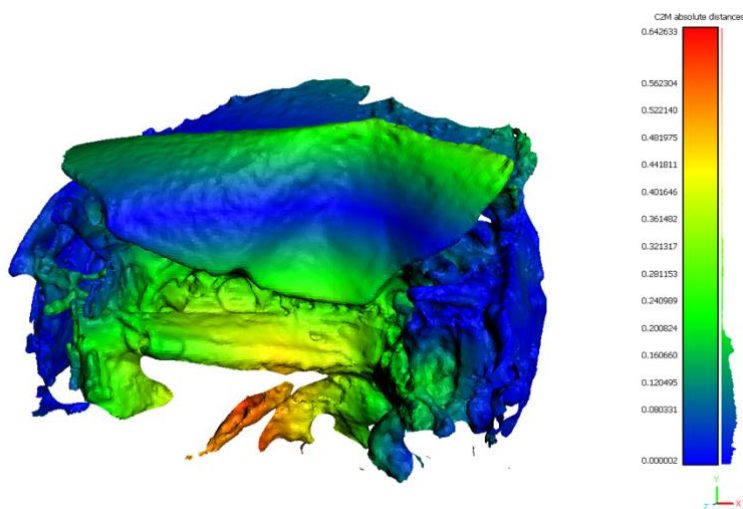
Após a identificação dos veículos, do ano e do modelo, foi obtido em banco de dados um objeto 3D semelhante sem avarias, a fim de elaborar a comparação com o veículo avariado. O desenvolvimento do veículo em software de modelagem permitiu gerar a malha e nuvem de pontos associada ao estado ausente de 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, $C_{MÁX}$ igual a 64 cm, conforme Figura 13.

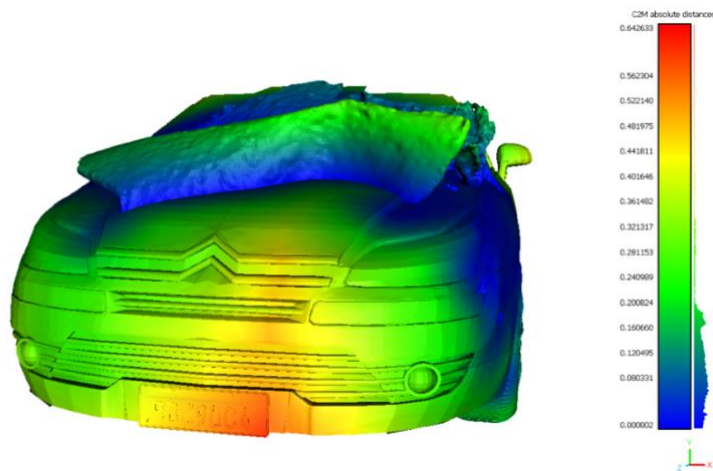
Figura 13 – Análise de deformação pelo método de distância entre nuvem de pontos e malha.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

A Figura 14 apresenta a sobreposição das malhas do veículo avariado e do veículo sem deformação.

Figura 14 – Análise de deformação pelo método de distância entre nuvem de pontos e malha.

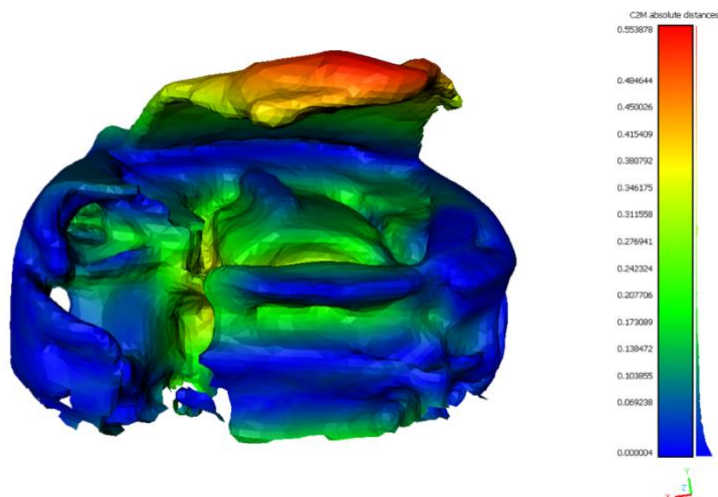


Fonte: Elaborado pelos Autores.

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, $C_{M\text{MAX}}$ igual à 55 cm, conforme Figura 15.

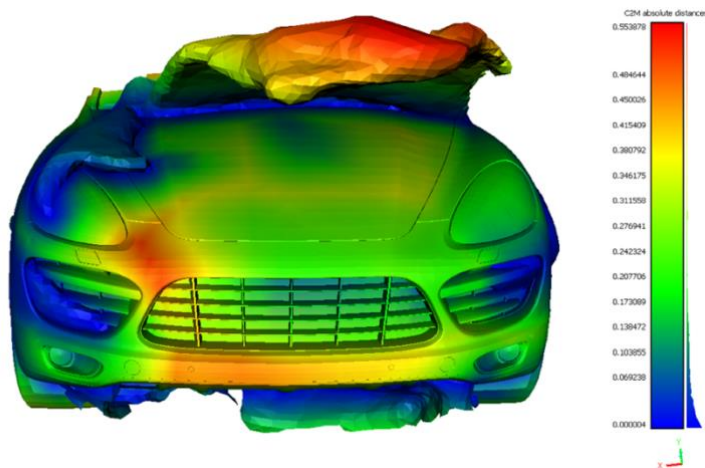
Finalmente, gerou-se uma vista 3D que compara a superfície 3D do veículo avariado com o modelo sem deformações (Figura 16).

Figura 15 – Análise de deformação pelo método de distância entre nuvem de pontos e malha.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 16 – Análise de deformação pelo método de distância entre nuvem de pontos e malha.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

3.3 Resultados

Ao final da captura, do processamento e das medições das deformações máximas nos veículos 1 e 2, comparou-se, na Tabela 6, os valores de maiores profundidades de deformação das medições realizadas *in loco* aos adquiridos do

modelo computacional. A Tabela 5 também apresenta o erro dimensional das deformações e do cálculo da velocidade.

Os resultados da variação de velocidade resultaram em diferença menor que 1% quando comparados o modelo estimado e o cálculo analítico.

Tabela 6 – Resultados deformação máxima e variação da velocidade (VV) estimada.

	V1	V2
Valor profundidade máxima de deformação real medido	70 cm	62 cm
Valor profundidade máxima de deformação nuvem comparação	63 cm	55 cm
Erro	10 %	11,29 %
VV com valor mensurado local	74 km/h	72 km/h
VV com valor obtido por nuvem de pontos	72 km/h	70 km/h
Erro	2,70 %	2,77 %

Fonte: Elaborado pelos Autores.

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

Tabela 7 – Cálculo de Energia Pelo Método de Campbell.

	V1	V2
Energia de Deformação com uso da profundidade máxima de deformação real – medido	216.791 N.m	212.454 N.m
Energia de Deformação com uso da profundidade máxima de deformação nuvem – comparação	213.014 N.m	208.413 N.m

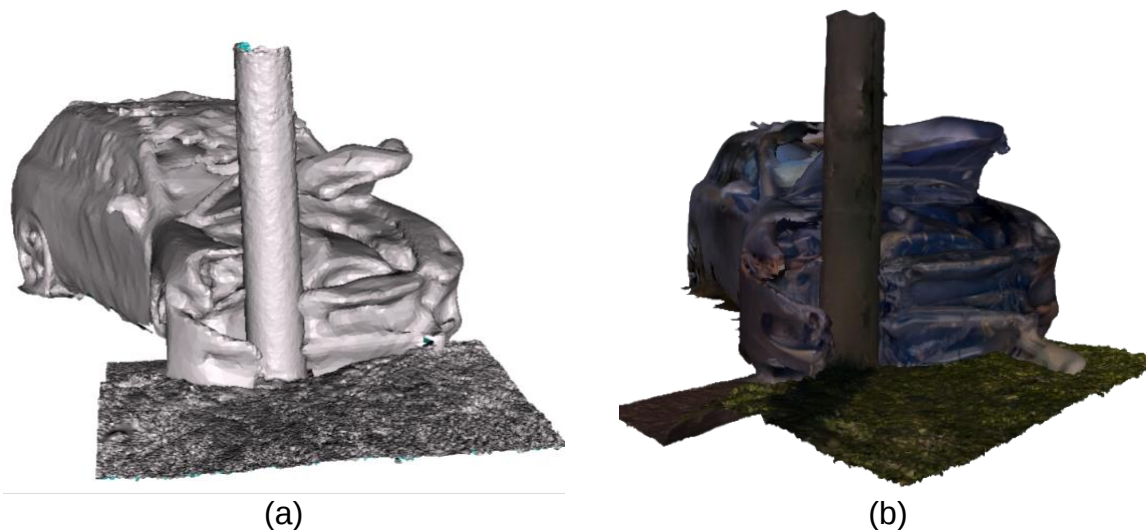
Fonte: Elaborado pelos Autores.

3.4 Outras aplicações importantes

No intuito de justificar a aplicação das técnicas de escaneamento a partir do uso do LiDAR disponível em smartphone, a Figura 17 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 17 – Reconstituição do sinistro em 3D.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

4. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma metodologia utilizada para o cálculo de velocidades de colisão de veículos com objetos fixos, através do escaneamento 3D e da análise de deformação pelo método de nuvem de pontos. A partir dos conhecimentos físicos de conservação de energia, as colisões e as avarias resultantes foram examinadas de maneira discreta, com a finalidade de se calcular a parcela de energia associada a deformação principal do veículo.

Finalmente, foram apresentados dois estudos de casos. Estudos, esses que permitiram a aplicação da metodologia descrita de maneira tangível, assim como a comparação do evento real com o modelo físico matemático proposto. A metodologia discutida servirá para a análise de inúmeros sinistros de trânsito que acontecem no Brasil todos os anos.

Os resultados foram satisfatórios na medição das deformações através de método comparativo entre o modelo avariado e o modelo sem avarias. Ainda que os erros de medição de deformação possam gerar erros na ordem de 10%, a análise de velocidade se torna bastante precisa, com erros inferiores a 1%, quando comparados os valores analíticos aos obtidos por medições computacionais.

Os métodos de escaneamento portáteis proporcionam uma economia significativa de tempo em comparação aos métodos tradicionais, quando se compara em minutos de processamento e em custo-benefício. Ainda, os scanners portáteis oferecem aos socorristas e peritos a capacidade de alcançar e escanear locais tradicionalmente inacessíveis de veículos danificados, como o interior ou o material rodante, garantindo, assim, uma varredura abrangente de todos os danos observados. Desse modo, os profissionais não se limitam pelo alcance ou pela capacidade de manobra dos scanners a laser terrestres tradicionais.

A adoção dessas técnicas por agências de segurança pública e por socorristas tem o potencial de auxiliar na limpeza mais rápida da cena e reduzir colisões

secundárias. Além disso, a documentação de danos do veículo no local do sinistro reduz a incerteza sobre o fato de a avaria ter ocorrido durante ou após o acidente.

REALIZAÇÃO



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPBELL, Kenneth L. **Energy as a Basis for Accident Severity—A Preliminary Study**. The University of Wisconsin-Madison, 1972.

CAMPBELL, Kenneth L. **Energy basis for collision severity**. SAE Transactions, 1974, 2114-2126. Doi: <https://doi.org/10.4271/740565>.

CHENG, M. et al. **Visualisation of Superficial Breast Changes**. [S. l.]: Citeseer, 1998.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Acidentes e mortes nas rodovias federais custaram ao país quase R\$ 13 bilhões em 2022**. Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/acidentes-e-mortes-nas-rodovias-federais-custaram-ao-pais-quase-13-bilhoes-em-2022>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

CORMACK, A. M. **Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications**. Citation, 1963, J. Appl. Phys. 34, 2722. Doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1729798>.

DAILY, J.; STRICKLAND, R. **Crush Analysis with Under-rides and the Coefficient of Restitution**. Institute of Police Technology and Management's. 24th Annual Special Problems in Traffic Crash Reconstruction, 2006.

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 2021, 21, 8076. Doi: <https://doi.org/10.3390/s21238076>.

DORJI, Y., SCHULDT, B., NEUDAM, L., DORJI, R., MIDDLEBY, K., ISASA, E., et al. **Three-dimensional Quantification of Tree Architecture from mobile Laser Scanning and Geometry Analysis**. Trees 35, 2021, 1385–1398. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02124-9>.

FIRESTONE, FLOYD A. **The Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves**. Departments of Physics and Engineering Research, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1946.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. **Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography**. Communications of the ACM, 1981, v. 24, n. 6, p. 381–395.

GIRARDEAU-MONTAUT, Daniel. **Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles**. Thèse. École Nationale Supérieure des Télécommunications. Télécom ParisTech, 2006.

IBGE. **Frota de veículos**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?ano=2022> >. Acesso em: 28 abril 2023.

LATIN NCAP. Disponível em: <<https://www.latinnncap.com/po/>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

LOPAC, Nikola; JURDANA, Irena, BRNELIC, Adrian; KRLJAN, Tomislav. **Application of Laser Systems for Detection and Ranging in the Modern Road Transportation and Maritime Sector**. Sensors, 2022, 22, 5946. Doi: <https://doi.org/10.3390/s22165946>.

LUETZENBURG, Gregor; KROON, Aart; BJØRK, Anders A. **Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences**. Scientific Reports, 2021.

MAIMAN, T. **Stimulated Optical Radiation in Ruby**. Nature 187, 493–494 (1960). Doi: <https://doi.org/10.1038/187493a0>.

MCCANNE, Steven. **A Comprehensive Guide to LiDAR: Light Detection and Ranging for Remote Sensing Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

OICA. **World Vehicles in Use - Total Vehicles**. 2021. Disponível em: <https://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>. Acesso em: 30 abril 2023.

SMITH, G. **The early laser years at Hughes Aircraft Company**. IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 20, no. 6, pp. 577-584, June 1984. Doi: <https://doi.org/10.1109/JQE.1984.1072445>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Global status report on road safety 2018**. Geneva: World Health Organization; 2018. Licence: CC BYNC-SA 3.0 IGO. POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (PRF). **Dados Abertos da PRF**. Polícia Rodoviária Federal. Brasília, 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-da-prf> >. Acesso em: 30 abril 2023.

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT (STATISTA). **Number of vehicles in use worldwide from 2006 to 2021 (in millions)**. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/251721/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>. Acesso em: 30 abr. 2023.

TEPPATI LOSÈ, Lorenzo; SPREAFICO, Alessandra; CHIABRANDO, Filiberto; GIULIO TONOLO, Fabio. **Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain**. Remote Sensing, 2022.

WORLD BANK. **Motor vehicles (per 1,000 people)**. 2021. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/IS.VEH.NVEH.P3>. Acesso em: 30 abril 2023.