

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM COLISÕES A PARTIR DE IMAGENS COM O SOFTWARE IMAGEJ

AUTORES

Antonio Pereira Arantes Neto

Pedro Henrique Garcia Gomes

REALIZAÇÃO

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM COLISÕES A PARTIR DE IMAGENS COM O SOFTWARE IMAGEJ

METHODOLOGY FOR MEASURING DEFORMATION IN COLLISIONS FROM IMAGES WITH IMAGEJ SOFTWARE

RESUMO

A análise pericial após um acidente de trânsito pode ser uma tarefa complexa devido à falta de evidências e vestígios. Portanto, é essencial que o avaliador pericial utilize ferramentas eficientes e econômicas para obter dados precisos na reconstituição e no cálculo de parâmetros, como a velocidade do veículo no momento da colisão. Este artigo apresenta os resultados preliminares de medições de modelos comparativos por fotogrametria utilizando uma solução de reconstrução de baixo custo, desenvolvida com a tecnologia de medição pelo *software ImageJ*, uma ferramenta de código aberto. A análise técnica pericial para o cálculo da velocidade utiliza o método de energia de deformação. Para isso, a fotogrametria do veículo é realizada e, por meio da análise de imagens, é possível comparar os valores das medições do veículo com os valores reais e, assim, chegar a valores altamente confiáveis. A metodologia descrita foi aplicada em dois casos reais, nos quais a investigação pericial do veículo e do local do acidente permitiram uma compreensão prática da aplicação desses conhecimentos físicos.

Palavras-chave: Imagej; Correlação digital de imagens; Reconstrução de acidentes, Velocidade de colisão; Campbell.

ABSTRACT

Forensic analysis after a traffic accident can be a complex task due to the lack of evidence and traces. Therefore, it is essential that the expert evaluator use efficient and economical tools to obtain accurate data in the reconstruction and in the calculation of parameters, such as the vehicle speed at the time of the collision. This article presents the preliminary results of measurements of comparative models by photogrammetry using a low-cost reconstruction solution, developed with measurement technology by *ImageJ* software, an open-source tool. The expert technical analysis for calculating the velocity uses the strain energy method. For this, the vehicle's photogrammetry is carried out and, through image analysis, it is possible to compare the values of the vehicle's measurements with the real values and, so, arrive at highly reliable values. The described methodology was applied in two real cases, in which the expert investigation of the vehicle and the accident site allowed a practical understanding of the application of this physical knowledge.

Keywords: Imagej; Digital correlation of images; Crash reconstruction, Collision speed; Campbell.

1. INTRODUÇÃO

A fotogrametria, conforme ASP (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, a topografia, a arquitetura, a engenharia e a 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 (1983) desenvolveu algoritmos numéricos e conduziu experimentos de medição utilizando imagens registradas opticamente, 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 et al., 2009; GÓRSZCZYK et al., 2009). 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 mais uma vantagem desse método. Além disso, pode ser feito nos modos 2D e 3D (medidas de correlação de imagem digital volumétrica 3D (VDIC)) (Sutton et al., 2009).

No presente estudo, uma técnica de CID 2D é utilizada. Dois parâmetros que influenciam a precisão das imagens capturadas na técnica CID são a faixa numérica de um pixel (resolução em nível de cinza) e o número de pixels. O maior alcance numérico de um pixel levaria a uma melhor identificação da distinção entre diferentes intensidades de luz e cores, aumentando a precisão da imagem. Além disso, mais pixels em uma imagem aumenta a precisão da imagem.

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*, desenvolvido em Java por Wayne Rasband no *National Institute of Mental Health* dos Estados Unidos. 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, 2011).

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.

1.1 IMAGEJ

O *ImageJ* 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 automatizados de hematologia (BARBORIAK et al, 2005; BURGER et al, 2007; ELICEIRI et al, 2005).

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, um aplicativo para download ou em qualquer computador com uma máquina virtual Java 5 ou posterior. Distribuições para download estão disponíveis para Microsoft Windows, Mac OS

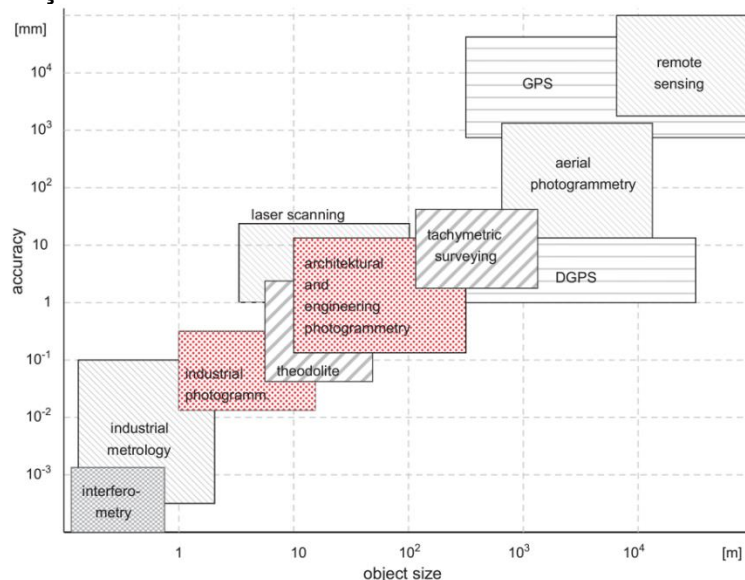
clássico, macOS, Linux e Sharp Zaurus PDA. O código-fonte do *ImageJ* está disponível gratuitamente no site do *software*.

1.2 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 1 que ilustra a vantagem da fotogrametria de curta variação (*Close Range Photogrammetry*) com relação à acuracidade e ao tamanho dos objetos.

Figura 1 – Relação entre tamanho do objeto e acuracidade para diferentes métodos de medições sem contato.



Fonte: Luhmann et al (2006).

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.

1.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

Conforme apresentado na Tabela 1, são descritos, de forma sucinta, os principais métodos de determinação de velocidade de colisão e análise forense para sinistros de trânsito.

Tabela 1 - Métodos de determinação da velocidade de colisão.

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 se determinar a velocidade de impacto;	- Pode ser difícil obter-se 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-se 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	- Pode fornecer dados precisos sobre a velocidade	- Nem todos os veículos possuem sensores ou sistemas

	velocidade do motor e a posição do acelerador, determinar a velocidade de impacto.	do veículo imediatamente antes do impacto; para a de	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;
Fotogrametria	Utilização de programas que realizam processamento digital de imagens.	- Análise de vestígios de sinistro por meio de imagens em situações de elevada distância ou escassez de evidências físicas.	- Nem todos os eventos geram imagens claras de todos os pontos necessários para análise.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

2. METODOLOGIA

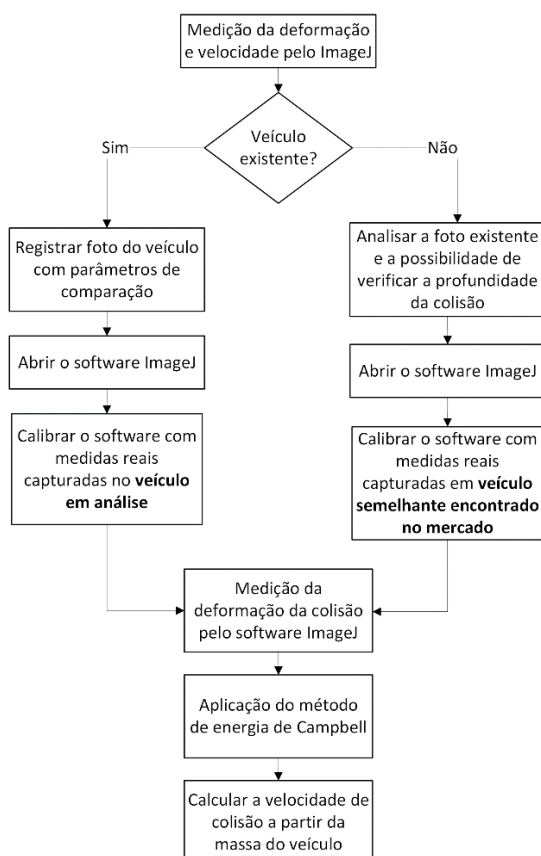
A velocidade com que um automóvel se desloca é um aspecto crucial que é frequentemente levado em consideração nas investigações e debates judiciais sobre a causa de colisões no trânsito. Há um questionamento constante sobre o valor da velocidade no contexto da aplicação da lei.

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 começaram a crescer em quantidade e qualidade.

A prova pericial em algumas oportunidades se torna restrita e de poucas informações. Em colisões no trânsito, em diversas situações, restam apenas vestígios em imagens e vídeos.

Neste artigo, a análise da velocidade foi realizada através da fotogrametria de veículos aplicada ao software *ImageJ*. Em comparação aos resultados obtidos pela medição no software, comparou-se com as aquisições reais capturadas em campo para fins de validação. A Figura 2 apresenta o fluxograma metodológico utilizado.

Figura 2 – Metodologia para medição da deformação e para cálculo da velocidade de colisão.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

No *software* é necessário importar a fotografia existente do veículo avariado, seja ela de autoria própria ou de terceiros. Após a importação, a imagem deverá ser convertida em escala de cores de 8 a 16 bits.

A conversão da escala de cores, além de deixar o arquivo menor, facilitará ao *software* a interpretação e a medição de imagem ao que corresponde sua forma, brilho ou distribuição de cor. Para cada ponto da imagem, são obtidos valores na forma de dados radiométricos (intensidade, tons cinza, valor da cor) e dados geométricos (posição na imagem).

Em seguida, o processo deverá ser o de calibração das imagens com dados reais e obtenção da curva de calibração. As medidas, uma vez calibradas, resultarão em baixo erro na análise e as deformações poderão ser obtidas.

3. RESULTADOS

A aplicação da metodologia foi realizada a partir do estudo de caso de dois acidentes de colisão frontal em dois veículos descritos na Tabela 2 e Figura 3.

Tabela 2 – Veículos analisados.

Veículo	Tipo de colisão	Denominação
Fiat Uno 2014	Colisão frontal com barreira fixa	V1
Nissan Frontier 2014	Colisão frontal com poste	V2

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 3 – Veículos avariados (a) V1 e (b) V2.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

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 (Schindeli 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.

3.1 Estudo das deformações de V1

O primeiro veículo de análise (Figura 4), denominado de V1, foi identificado e analisado após uma colisão com poste de concreto.

Figura 4 – Vista do veículo sinistrado.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

O veículo foi analisado e medido (Figura 5) 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 3.

Figura 5 – Fotogrametria de V1.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Tabela 3 – Calibração medidas reais com medidas da imagem em análise para V1. (4032x3024 Pixels - 8 bits)

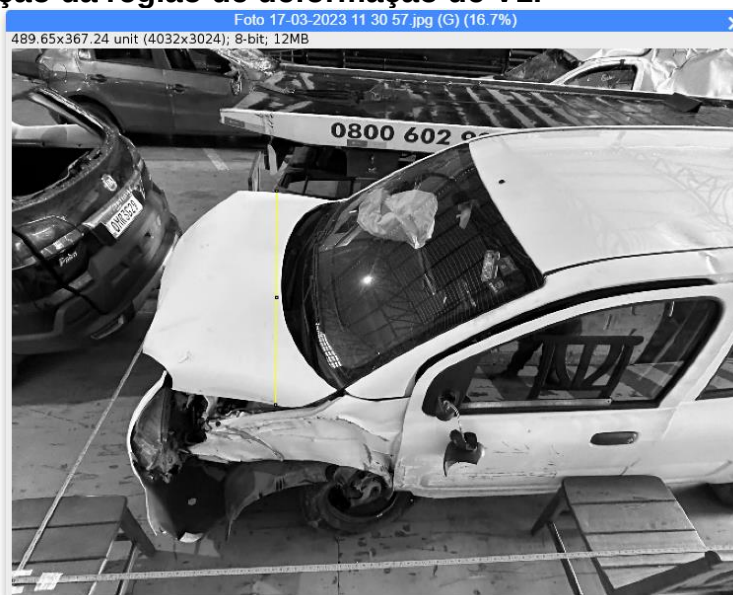
Medida	Valor real	Valor na imagem
1 – Largura maçaneta	16 cm	256 px
2 – Largura porta motorista	105 cm	1452 px
3 – Altura porta	138 cm	1277 px
Calibração linear		14,1068 pixels/cm

Fonte: Elaborado pelos Autores.

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 6) (níveis de cinza entre 0-255, necessário para o cálculo da transformação *watershed*), para, então, obter-se a imagem binária.

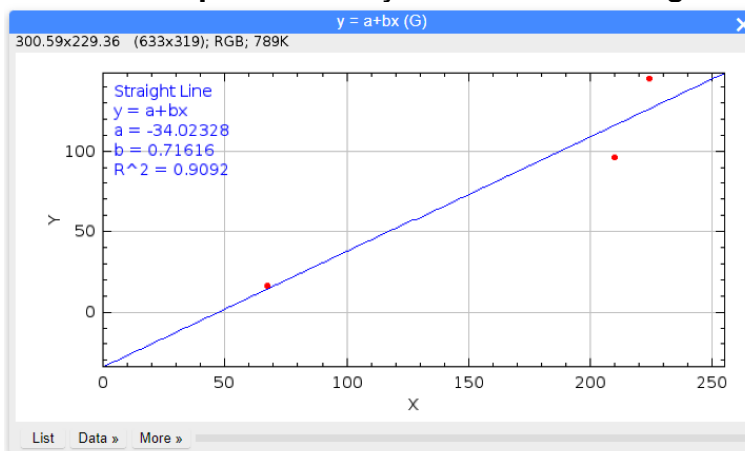
Figura 6 - Medição da região de deformação de V1.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Após entrada de valores de calibração, foi utilizado o método de linearização escalar (Figura 7), e gerada a curva de calibração.

Figura 7 - Regressão linear para calibração através do ImageJ.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Após calibração, foi mensurado o valor de deformação do veículo junto ao software, e identificado o valor de 35.8 cm. Em medições reais do veículo, o valor de deformação do mesmo foi de 34,2 cm (Figura 8).

Figura 8 – Resultados de deformação obtidos (a) na medição real e (b) no software para V1.



(a)

ea	Mean	Min	Max	Angle	Length
174	23.524	-33.216	145.353	178.781	34.254

(b)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

3.2 Estudo das deformações e velocidade de colisão de V2

A análise de V2 (Figura 9a) 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 9 – Veículo 2 em análise (a) avariado e (b) sem avarias para medições reais.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A Tabela 4 apresenta a calibração dos valores obtidos entre a medição real de modelo semelhante ao sinistrado e a medida através do software ImageJ.

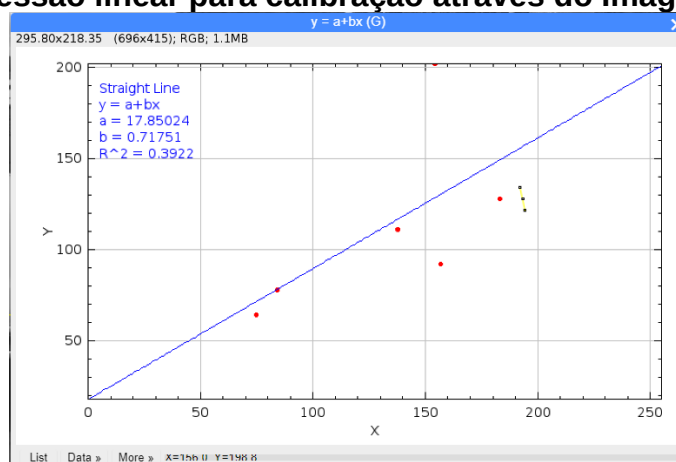
Tabela 4 – Calibração medidas reais com medidas da imagem em análise para V2 Frontier (1599x899 Pixels - 8 bits).

Medida	Valor real	Valor na imagem
1 – Largura do vidro porta traseira	64 cm	166 px
2 – Largura vidro dianteiro a retrovisor	78 cm	110 px
3 – Altura porta	128 cm	332 px
Calibração linear		2,5313 pixels/cm

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A partir dos dados da Tabela 4, a regressão linear uniformizará os valores das medidas, conforme Figura 10.

Figura 10 – Regressão linear para calibração através do ImageJ.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Calibrado o software com a imagem apresentada, foi possível realizar-se a medição do valor de deformação (Figura 11).

Figura 11 – Fotogrametria de V2.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Em medição do valor de deformação do veículo, obtém-se 36,2 cm (Figura 10) 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 pode-se 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.

Figura 12 – Medição através do ImageJ da maior deformação.

Results					
File Edit Font Results					
Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
792	83.460	44.239	123.532	179.363	36.288

Fonte: Elaborado pelos autores.

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.

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

Energia de deformação por Campbell	Valor
V1	197.383 N.m
V2	197.577 N.m

4. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma metodologia utilizada para o cálculo de velocidades de colisão de veículo com objetos fixos, em particular com postes de concreto, através de fotogrametria e de análise de deformação pelo método de Campbell de deformações, utilizado para o cálculo da velocidade de colisão. A partir dos conhecimentos físicos de conservação de energia, as colisões e as avarias resultantes foram examinadas de maneira discreta, de forma a se calcular a parcela de energia associada à deformação principal do veículo.

Este estudo testou e validou um *software* livre para análise de imagens, a fim de torná-lo uma ferramenta útil para pesquisadores forenses que trabalham com análise de imagens periciais, devidamente documentadas. Além disso, a ferramenta possibilita comparar os resultados obtidos pelo *software* com a análise in loco dos veículos.

Assim, o *software ImageJ* apresentou-se como um importante mecanismo no tratamento de imagens e na análise quantitativa de imagens, oferecendo muitos recursos como parte de seu pacote padrão e outros tantos como *plug-ins* e extensões do *software*, que se adaptam para cada tipo de uso.

Finalmente, foram apresentados dois estudos de casos. Estudos estes que permitiram a aplicação da metodologia descrita de maneira tangível bem 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.

Com este estudo foi possível, através do estudo de V1, obter valores de deformação com erro na ordem de 4,5%. Já no estudo de V2, gerou-se o valor da deformação e, a partir dele, pôde-se calcular a velocidade de colisão do veículo. Tem-se, então, uma ferramenta extremamente prática no estudo forense de colisões veiculares com objetos fixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY (ASP). **Manual of Photogrammetry**. 1966, 1220p.

BARBORIAK, D., PÁDUA, A., YORK, G., MACFALL, J. (2005). **Creation of DICOM—Aware Applications Using ImageJ**. Journal of Digital Imaging, 2005. 18 (2): 91–9. Doi: [10.1007/s10278-004-1879-4](https://doi.org/10.1007/s10278-004-1879-4).

BURGER, W., BURGE, M. **Digital Image Processing: An Algorithmic Approach Using Java**. Springer. ISBN 978-1-84628-379-6.

DIAS, F.C., **Uso do Software ImageJ para Análise Quantitativa de Imagens de Microestruturas de Materiais**, Dissertação de Mestrado, INPE, 2008.

ELICEIRI, K., RUEDEN, C. **Tools for visualizing multidimensional images from living specimens**. Photochem Photobiol, 2007. 81 (5): 1116–1122. Doi: [10.1562/2004-11-22-IR-377](https://doi.org/10.1562/2004-11-22-IR-377).

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

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

RASBAND, W., **ImageJ documentation**. Disponível em: <www.rsb.info.nih.gov>, Acesso em: 29 abr. 2023.

GÓRSZCZYK, J.; MALICKI, K.; ZYCH, T. **Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing**. Materials 2019, 12, 2349. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma12152349>.

GRANSHAW, S. I., **Laussedat bicentenary: origins of photogrammetry**. Photogram Rec. 34: 128-147, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1111/phor.12277>.

LUHMANN, T.; ROBSON S.; KYLE, S AND HARLEY, I. **Close Range Photogrammetry Principles, techniques, and applications**. Whittles Publishing, 2006.

SUTTON, Michael A.; ORTEU Jean J.; SCHREIER, Hubert. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications**. Springer Science & Business Media, 2009.