

# Visualização interativa 3D e simulação de dinâmica de acidentes de trânsito em forense utilizando a *Blender Game Engine* em um *serious game*

Átila E. Oliveira Yvens R. Serpa Ygor R. Serpa Augusto P. Abreu Daniel V. Macedo Maria Andréia F. Rodrigues  
Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada (PPGIA)  
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)  
Fortaleza-CE, Brasil  
{atilaeo, yvensre, ygor.reboucas, augustodepaula, danielvalentemacedo, andreia.formico}@gmail.com

**Resumo**— Este trabalho tem por objetivo a reconstrução de acidentes de trânsito envolvendo veículos, por meio de visualizações interativas 3D e simulações de dinâmica em forense. Esses acidentes de trânsito foram modelados em um *serious game* que desenvolvemos usando a *Blender Game Engine* (BGE). Dividimos o processo em quatro etapas básicas: aquisição, modelagem, simulação e análise dos dados. Adicionalmente, implementamos dois casos comuns de acidentes de trânsito com colisão, causados por: desconsideração à preferência de passagem, colidindo lateralmente; e inobservância de obstáculo parado na via, abalroando com o mesmo. Além disso, também foram realizadas comparações entre as evidências, os conhecimentos de um perito e as simulações geradas. Os resultados mostram vantagens e desvantagens no uso da BGE, concluindo com uma breve discussão sobre o grau de confiabilidade desejado nas análises para ilustrar a opinião do perito em forense no fórum.

**Palavras-chave**—visualização interativa 3D, simulação de dinâmica de acidentes de trânsito, forense, *Blender Game Engine*, *serious games*

## I. INTRODUÇÃO

Recentemente, os peritos forenses têm utilizado tecnologias mais modernas em reconstrução ou modelagem da cena de crime e posterior simulação, para facilitar a compreensão do fato [1]. Atividade esta que, em regra, demanda tempo e custos elevados, principalmente, pelo pouco domínio de ferramentas e equipamentos computacionais mais específicos, por parte do profissional que faz a perícia do local onde o acidente ocorreu.

Ao investigar incidentes causados por crimes ou acidentes de trânsito, é comum não haver certeza absoluta sobre o que realmente ocorreu, geralmente, devido à falta de evidências ou de testemunhas. A reconstrução e conseqüente visualização 3D em forense busca então estabelecer uma seqüência de eventos sobre os fatos ocorridos no acidente à luz do estudo, análise e interpretação das evidências.

Os eventos podem assim ser reconstruídos e concatenados em sua provável seqüência temporal, fazendo uso de informações básicas e documentos coletados (anotações, fotografias, imagens de vídeo, esboços de desenhos, etc.), raciocínio lógico, experiência do perito e método científico. Em geral, a reconstrução ocorre presencialmente, idealmente,

na mesma hora e local onde aconteceu o incidente, com o objetivo de recriá-lo da forma mais precisa possível, iniciando, muitas vezes, com um percurso na cena do incidente. As evidências são então coletadas para a análise [2]. Entrevistas com eventuais vítimas ou testemunhas também são consideradas. De posse dessas informações, o investigador elabora uma provável hipótese (ou mais de uma) sobre o que aconteceu, por que aconteceu e como aconteceu [3, 4, 5].

Entretanto, levando-se em conta que há muitas variáveis importantes a serem consideradas, reconstruir o ocorrido com alto grau de certeza é sempre um grande desafio para o perito. Algumas vezes, os fatos não se esclarecem completamente, restando certas dúvidas relacionadas à precisão e completude da reconstrução [6].

Este trabalho tem por objetivo a reconstrução de acidentes de trânsito envolvendo veículos, por meio de visualizações interativas 3D e simulações de dinâmica em forense. Esses acidentes de trânsito foram modelados em um *serious game* [7] que desenvolvemos usando a *Blender Game Engine* (BGE) [8]. Dividimos o processo em quatro etapas básicas: aquisição, modelagem, simulação e análise dos dados. Adicionalmente, implementamos dois casos comuns de acidentes de trânsito com colisão, causados por: desconsideração à preferência de passagem, colidindo lateralmente; e inobservância de obstáculo parado na via, abalroando com o mesmo. Além disso, comparações entre as evidências, a *expertise* de um perito e as simulações 3D geradas também foram realizadas. Os resultados mostram vantagens e desvantagens no uso da BGE, concluindo com uma breve discussão sobre o grau de confiabilidade desejado nas análises para ilustrar a opinião do perito em forense no fórum.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Todas as informações coletadas na cena de um acidente de trânsito podem ser convertidas em dados de entrada de um *serious game*, desde que este tenha tal suporte [7]. A modelagem do desenvolvedor embutida na lógica do jogo se encarregará de gerar um conjunto de possíveis representações visuais, baseadas em diferentes evidências. Desta forma, vários cenários 3D podem ser gerados e simulados, até que os resultados converjam para a mais provável das seqüências de eventos ocorrida.

Pode-se dividir o processo de simulação da dinâmica de local do incidente, no contexto dos *serious games*, nas seguintes etapas: aquisição, modelagem 3D, simulação e análise dos dados. A fase de modelagem 3D pode ser realizada manualmente (por intermédio de ferramentas gráficas simples e *open source*, tais como o *SketchUp* [9]), ou mediada por computador.

Diversas são as ferramentas existentes para a visualização e simulação em forense, variando desde as mais sofisticadas e de difícil customização, até as que exageradamente simplificam a modelagem do problema. Por exemplo, em [1] os autores reportam a obtenção de resultados relevantes usando a ferramenta *Instant Scene Modeler* (iSM). A partir de câmeras e algoritmos específicos esta gera modelos 3D de alta qualidade, possibilitando o seu uso em simulações da dinâmica, como pós-levantamento ao ocorrido. Outro exemplo é descrito em [10], no qual os autores descrevem o uso de um mecanismo combinado que engloba *Global Positioning System* (GPS), *Ultra-Wide Band* (UWB) e realidade aumentada para aquisição e modelagem automática de informações, via *scanner* 3D.

Algumas bibliotecas comerciais de código utilitário construído sobre o *OpenGL*, para gerar visualizações 3D baseadas em simulações em tempo real, estão disponíveis na plataforma *OpenGL Performer* [11]. Adicionalmente, a simulação discreta de colisão entre corpos rígidos pode ser modelada com algumas *game engines*, por exemplo: *Unity Game Engine* [12], *Blender Game Engine* (BGE) [8], *Doom 3 Engine* [13], *OGRE* [14], etc.

Um estudo comparativo sobre *game engines* em simulações 3D e o esquema geral de funcionamento das mesmas é apresentado em [15]. De forma complementar, um detalhamento desses ambientes é descrito em [16], incluindo a avaliação de *game engines* mais modernas: *Cry Engine* [17], *Hero Engine*, *Source Engine*, *Unreal Engine 3* [18] e *Vision Engine*. Estudos de caso desenvolvidos com as mesmas podem ser encontrados em [19, 20].

Um ambiente específico para simulação de colisão entre veículos é descrito em [5]. Os autores simulam a deformação de objetos usando análise de elementos finitos para deduzir a velocidade dos veículos e a transferência de energia na colisão. O uso de ambientes 3D mais robustos, apesar de suas vantagens quanto ao realismo gráfico gerado, apresenta também desvantagens, por serem sistemas geralmente proprietários, custosos e não extensíveis. Além disso, alguns não geram simulações em tempo real, tendo que executar a simulação, para somente depois exibir o resultado visual, na forma de uma animação.

Os simuladores desenvolvidos com alguns dos ambientes anteriormente citados, variam de educativos no trânsito até os que visam demonstrar situações de colisão simuladas, perante o Judiciário. Dentre os educativos no trânsito, podemos citar: *Smart Driver* [21], *EducaTrans* [22], *VRUM* [23], *City Car Driving* [24] e *IntEducaTrânsito* [7]. Alguns destes suportam adicionalmente a modelagem de colisões entre veículos. Os simuladores usados na prova de hipóteses forenses são, em geral, desenvolvidos em ambientes específicos [2, 5, 3, 25]. Vale destacar ainda, os ambientes que permitem aos

participantes a realização cooperativa das etapas de modelagem, simulação e obtenção de dados [4].

A avaliação de confiabilidade tem sido outro aspecto relevante para o uso em forense das ferramentas citadas anteriormente [6], servindo como uma das bases para investigar a fidelidade e precisão do modelo simulado, através da comparação ao fato ocorrido na vida real.

### III. RECONSTRUÇÃO EM FORENSE

Visualização interativa 3D produzindo animações por computador e visualização interativa 3D produzindo animações forense ou simulações são áreas bem distintas [2]. Nas animações forense para a reconstrução da cena do fato ocorrido, todos os objetos do ambiente devem seguir os princípios fundamentais da Física [26, 27]. Neste contexto, a presença de evidências são fundamentais para a reconstrução da cena e, particularmente, em casos de colisão entre veículos, gerando acidentes de trânsito.

Em alguns casos, há controvérsias sobre quem ou o quê exatamente foi o responsável pela colisão. Assim, quanto maior a precisão e o número de evidências (modelos dos veículos, testemunhos visuais, fotografias, esboços gráficos, imagens de vídeo, informações sobre as condições da via e climáticas, posições e velocidades dos veículos, etc.), mais fundamentado é o processo de reconstrução. Comumente, a investigação e reconstrução dos fatos acontece na ordem temporal reversa, ou seja, parte das posições de parada, geradas como resposta à colisão entre os veículos envolvidos, na tentativa de estimar a origem do fato.

Leis da Física Fundamental, tais como, as de Conservação da Energia e *Momentum* são também aplicadas na reconstrução dos fatos. Estas são baseadas na terceira Lei de Newton ou Princípio de Ação e Reação, um dos pilares da Mecânica Clássica, o qual enuncia: “Para toda interação, na forma de força, que um corpo *A* aplica sobre um corpo *B*, a partir de *B*, *A* irá receber uma força de mesma intensidade e direção, porém, de sentido oposto” [26, 27]. Ou seja, considerando-se que um veículo em movimento possui Energia Cinética, ao colidir com outro veículo, essa energia é dissipada na via durante a derrapagem do veículo, ou ao colidir com outras superfícies (causando, por exemplo, deformação ou mesmo vítimas). Assim, a energia existente antes do impacto será convertida em outras formas de energia. Mais especificamente, a marca de derrapagem é a marca que um pneu faz na via quando a roda do veículo pára e se arrasta na rua, sendo importante para estimar a velocidade máxima e mínima do veículo antes do impacto.

O *Momentum* está relacionado à massa e velocidade do veículo. De forma análoga, a Lei de Conservação do *Momentum* afirma que “O *Momentum* total de todos os veículos envolvidos permanecerá o mesmo, embora o *Momentum* individual de um veículo se alterará”. Um exemplo típico é o de colisão entre um veículo em movimento contra um veículo parado. Ao colidir, o veículo que estava parado ganhará *Momentum* e o veículo em movimento perderá, embora o *Momentum* total permaneça o mesmo.

Assim, realizando cálculos e análises baseados em energia e *Momentum* dos veículos podemos encontrar as velocidades iniciais e finais dos carros envolvidos na colisão, de forma a melhor suportar a reconstrução da seqüência de eventos ocorridos. Essa descoberta facilita a identificação, por exemplo, se o veículo estava em alta velocidade, se havia outros veículos ou pedestres posicionados no local (no momento da colisão) e quem seria o provável causador do incidente.

#### IV. VISUALIZAÇÃO INTERATIVA 3D DE VEÍCULOS EM COLISÃO NO JOGO

No *serious game* que desenvolvemos [7], simulamos casos de acidentes de trânsito usando leis da Física via BGE [8]. Nestas situações, o condutor de um veículo infringe certas normas de trânsito. Como consequência, colide com outro veículo. Os estudos de caso e os dados de entrada em todas as modelagens foram fornecidos por um perito forense e serão detalhados na Seção V.

##### A. Modelagem Geométrica e Propriedades Físicas dos Veículos

Cada veículo é um corpo rígido circulando no ambiente 3D do jogo e possui, aproximadamente, 1.100 vértices (esquerda da Fig. 1). As coordenadas do centro de massa do carro (frontal, lateral, superior) são mostradas à direita da Fig. 1, do topo para a base, respectivamente. O coeficiente de elasticidade usado na modelagem é o do material da pintura do carro, onde ocorre o impacto. Os veículos têm a mesma massa, no valor de 2000kg.



Fig. 1. À esquerda, modelo 3D do carro gerado no jogo e, à direita, a posição do centro de massa.

##### B. Geração dos Veículos em Movimento no Jogo

Para gerar veículos em movimento no ambiente do jogo, construímos um sistema de simulação de colisões na BGE, baseado no posicionamento de geradores e pontos de controle (ambos são objetos 3D, invisíveis durante a execução do jogo), como mostra a Fig. 2. Os primeiros são responsáveis pela marcação da posição inicial dos veículos e são criados a partir da configuração inicial de suas variáveis (velocidade máxima, percurso ou seqüência de pontos de controle e símbolos da trajetória, bem como pintura da carroceria). Já os últimos, correspondem a pontos-chave que definem curvas ou trajetórias a serem seguidas pelo veículo.



Fig. 2. À esquerda, um exemplo de gerador; ao meio, do carro gerado; e, à direita, de um controlador.

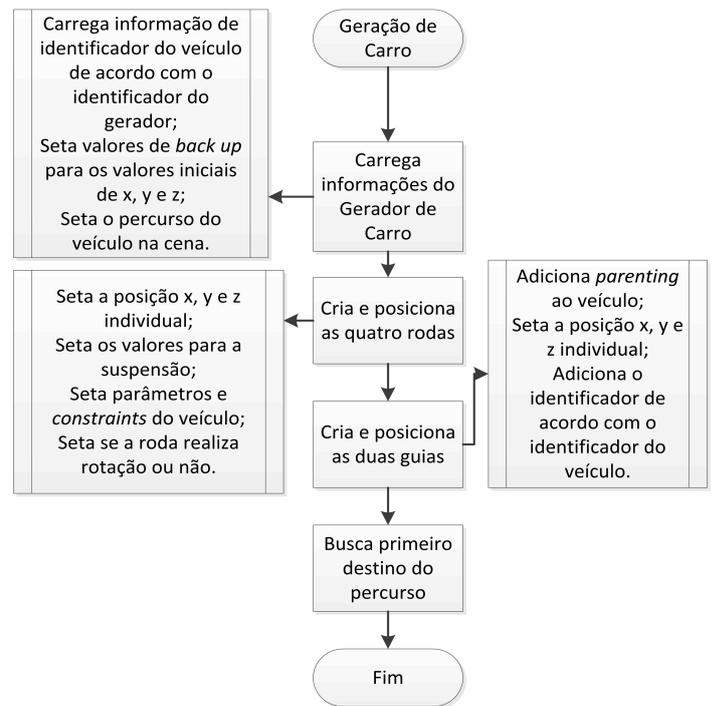


Fig. 3. Diagrama de geração do veículo.

Para gerar a visualização das animações no jogo, posicionamos os geradores (um para cada percurso dos veículos) e os respectivos pontos de controle pertencentes às diferentes trajetórias dos veículos, considerando que um mesmo ponto de controle pode eventualmente pertencer a diferentes percursos.

Como já mencionado, cada gerador armazena as variáveis dos veículos concebidos. Desta forma, ao criar um novo veículo, o gerador seta essas variáveis no veículo. O percurso é representado por uma seqüência de pontos de controle (*string*), acrescida de um símbolo especial: *O* (repetir o percurso desde o seu início), *X* (remover o veículo da cena) e *A* (permanecer parado na posição corrente).

Um único gerador pode criar mais de um veículo no jogo, até um limite máximo de 26 veículos simultâneos, definido na implementação. Esses veículos são instanciados de acordo com um temporizador, interno do gerador. O posicionamento e raio dos pneus, bem como os valores para a suspensão e altura dos

eixos são determinados durante a sua geração, usando as restrições nativas da BGE para veículos. Todo o processo de geração do veículo é detalhado na Fig. 3. Devido às simulações dos estudos de caso em forense selecionadas para este trabalho, optamos por usar um modelo de veículo que realiza sua trajetória a partir de guias que orientam o seu posicionamento ao longo da trajetória.

Tomando-se como base a posição do veículo, o objeto inicialmente instancia no ambiente 3D quatro rodas e duas guias. As rodas possuem o funcionamento padrão, sendo adicionadas ao objeto através dos *scripts* nativos do *Blender* para a montagem de veículos e posicionadas de acordo com padrões do veículo. Em seguida, são adicionadas informações relativas ao ângulo de rotação, suspensão, raio das rodas e se estas possuem rotação ou não (normalmente, apenas as duas rodas da frente do veículo realizam rotação).

A restrição de velocidade e a de rotação das rodas são propriedades do veículo e possuem valores padrão de 40km/h e 0.5 radianos, respectivamente. Após a montagem do carro e da chamada do *script* de geração e posicionamento das dependências, o veículo se deslocará entre os destinos consecutivos pertencentes à trajetória, no ambiente 3D do jogo.

Para orientar o veículo em direção aos destinos de seu percurso criamos também guias, posicionadas entre si a uma distância de 1,5 b.u. (*Blender Units*), próximas ao centro de massa do carro. O funcionamento das guias baseia-se nas suas respectivas distâncias em relação ao ponto destino. Quando a distância em relação ao destino for a mesma para as duas guias ( $dG1 = dG2$ ), o carro estará de frente para o destino (base da Fig. 4). Contudo, quando forem diferentes (topo da Fig. 4), o carro fará uma rotação no sentido da guia com a menor distância, ou seja, no sentido de  $dG1$  na Fig. 4, com o objetivo de igualar as duas distâncias, posicionando o veículo de frente para o destino.

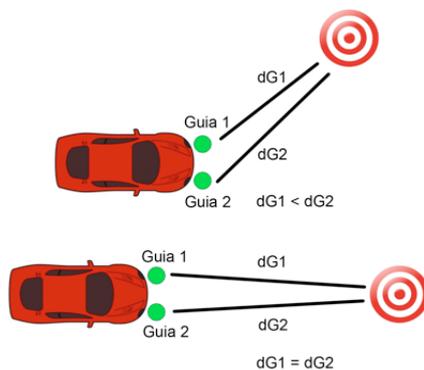


Fig. 4. Diagrama representando as guias.

## V. ESTUDOS DE CASO E AVALIAÇÕES FORENSE

Seguindo a fundamentação teórica e métodos apresentados na Seção III, desenvolvemos esta seção baseados em descrições de dois acidentes de trânsito mais comuns (fornecidas por um perito em forense, co-autor deste trabalho). Avaliações em forense foram então conduzidas pelo mesmo

perito, baseadas nos vestígios da cena e testemunhos de indivíduos.

### A. Estudo de Caso 1

O croqui referente ao Estudo de Caso 1 (Fig. 5) ilustra a situação na qual ocorre acidente por ausência de sinalização horizontal e vertical no cruzamento das vias. O veículo laranja trafega sentido sul-norte, em via composta de duplo sentido, separada por canteiro central, quando é atingido em sua lateral esquerda pelo veículo azul. O veículo azul, trafegando no sentido oeste-leste e verificando a ausência de sinalização horizontal, avança a preferencial, ignorando as normas do Código de Trânsito Brasileiro (CTB) [28] que menciona ter preferência, na ausência de sinalização, os veículos que trafegam à direita do motorista. Nesta situação, o veículo de cor laranja tem preferência de passagem e, portanto, o carro azul é o causador da ocorrência.

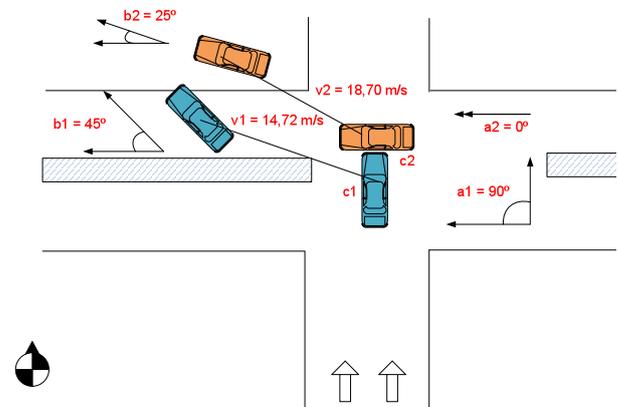


Fig. 5. Croqui do Estudo de Caso 1.

**Vestígios:** (1) Verificou-se o arrastamento dos pneumáticos dos veículos  $c_1$  e  $c_2$ , iniciado no cruzamento e no sentido sudoeste para nordeste, medindo:  $s(c_1) = 13,0m$  e  $s(c_2) = 21,0m$ ; (2) Verificou-se que a orientação dos danos foi: veículo  $c_1$ , da direita para esquerda e do setor anterior para o posterior; e veículo  $c_2$ , da esquerda para direita e do setor anterior para o posterior; e (3) A pista encontrava-se seca e apresentava camada asfáltica de boa qualidade.

**Testemunhos:** (1) Condutora do veículo  $c_1$  afirma que transitava em velocidade permitida na via, em torno de 60 km/h; (2) Condutora do veículo  $c_2$  afirma que transitava também em velocidade permitida (em torno de 60 km/h) e que, não havendo sinalização, teria prioridade no cruzamento.

**O Perito:** Admitindo-se que os deslocamentos dos veículos  $c_1$  e  $c_2$  em relação às suas posições originais foram de  $s(c_1) = 13,0m$  e  $s(c_2) = 21,0m$ , respectivamente, e que ambas as massas dos veículos  $c_1$  e  $c_2$  são iguais a 2000Kg, é possível calcular suas velocidades de deslocamento nesse intervalo:

$$v_1 = \sqrt[2]{2 * CoefAtrito * g * s(c_1)}$$

$$v_1 = \sqrt[2]{2 * 0,85 * 9,8 * 13,00} = 14,72m/s$$

$$v_2 = \sqrt[2]{2 * CoefAtrito * g * s(c_2)}$$

$$v_2 = \sqrt[2]{2 * 0,85 * 9,8 * 21,00} = 18,70m/s$$

Dado que:

$$Vic1 = \frac{v_1 * \text{sen}(a_2 - b_1) + \frac{m_2}{m_1} * v_2 * \text{sen}(a_2 - b_2)}{\text{sen}(a_2 - a_1)}$$

$$Vic1 = \frac{14,72 * \text{sen}(0 - 45) + \frac{1200}{1200} * 18,70 * \text{sen}(0 - 25)}{\text{sen}(0 - 90)}$$

$$Vic1 = \frac{14,72 * (-0,707106) + 1 * 18,70 * (-0,422618)}{-1}$$

$$Vic1 = \frac{-18,31}{-1} = 18,31m/s = 65,92km/h$$

Dado que:

$$Vic2 = \frac{\frac{m_1}{m_2} v_1 * \text{sen}(b_1 - a_1) + v_2 * \text{sen}(b_2 - a_1)}{\text{sen}(a_2 - a_1)}$$

$$Vic2 = \frac{\frac{1200}{1200} * 14,72 * \text{sen}(45 - 90) + 18,70 * \text{sen}(25 - 90)}{\text{sen}(0 - 90)}$$

$$Vic2 = \frac{1 * 14,72 * (-0,707106) + 18,70 * (-0,906307)}{-1}$$

$$Vic2 = \frac{-27,36}{-1} = 27,36m/s = 98,50km/h$$

## B. Estudo de Caso 2

O croqui referente ao Estudo de Caso 2 (Fig. 6) ilustra a situação na qual ocorre acidente por inobservância de obstáculo na via, por parte do condutor do veículo azul. O veículo laranja encontra-se parado quando é abalroado em seu setor posterior pelo veículo azul. Nesta situação, apesar do veículo laranja se encontrar irregularmente parado, o veículo azul é o causador do acidente.

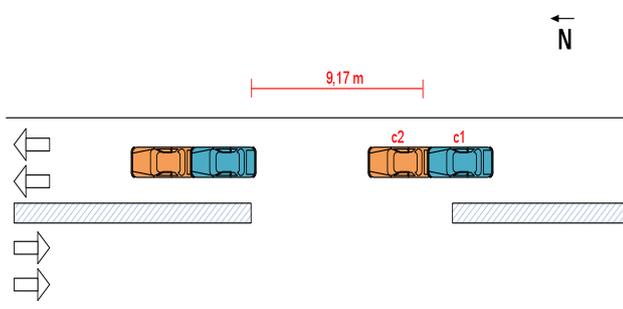


Fig. 6. Croqui do Estudo de Caso 2.

*Vestígios:* (1) Não se verificou frenagem no local; (2) Após a colisão, ambos os veículos foram deslocados por 9,17m; (3) Verificou-se que a orientação dos danos foi a seguinte: veículo azul  $c_1$  da região anterior para posterior e veículo laranja  $c_2$  da região posterior para anterior; e (4) A pista encontrava-se seca e apresentava camada asfáltica de boa qualidade.

*Testemunhos:* (1) Condutor do veículo  $c_1$  afirma que transitava em velocidade permitida, em torno de 50 km/h; (2) Condutor do veículo  $c_2$  afirma que o veículo encontrava-se parado por deficiência mecânica.

*O Perito:* Admitindo-se massa dos veículos  $c_1$  e  $c_2 = 2000\text{Kg}$ ; deslocamento após a colisão de 9,17m; e coeficiente de atrito da rua de 0,85, pode-se calcular a velocidade final dos veículos  $c_1$  e  $c_2$  após a colisão:

$$Vf_1 = \sqrt[2]{2 * CoefAtrito * g * s(c1)}$$

$$Vf_1 = \sqrt[2]{2 * 0,85 * 9,8 * 9,17}$$

$$Vf_1 = 12,36 m/s = 44,50 km/h$$

$$Vf_2 = \sqrt[2]{2 * CoefAtrito * g * s(c2)}$$

$$Vf_2 = \sqrt[2]{2 * 0,85 * 9,8 * 9,17}$$

$$Vf_2 = 12,36 m/s = 44,50 km/h$$

A quantidade de movimento dos veículos  $c_1$  e  $c_2$  é assim calculada:

$$Qf_1 = m_1 * Vf_1$$

$$Qf_1 = 2000 * 12,36 = 24.720\text{Kg.m/s}$$

$$Qf_2 = m_2 * Vf_2$$

$$Qf_2 = 2000 * 12,36 = 24.720\text{Kg.m/s}$$

A quantidade de movimento resultante após o abalroamento dos veículos  $c_1$  e  $c_2$  é então:

$$QR = Qf_1 + Qf_2 = 24.720 + 24.720 = 49.440\text{kg.m/s}$$

Conseqüentemente, a velocidade no instante do abalroamento dos veículos  $c_1$  e  $c_2$  é:

$$Qi_1 = m_1 * Vic1$$

$$Vic1 = \frac{Qi_1}{m_1}$$

$$Vic1 = \frac{49.440}{2000} = 24,72m/s = 89km/h$$

## VI. SIMULAÇÕES 3D E RESULTADOS

Para cada um dos dois estudos de caso da Seção V, realizamos dezesseis testes ou simulações 3D na BGE, na forma numérica e de animações. Englobamos espacialmente os veículos usando *colliders*, quatro deles usando uma caixa envoltória (*box collider*) e doze, usando um envelope convexo (*convex hull*), com 100, 200 e 1000 vértices. O uso de *convex hull* com menos vértices, em princípio, minimizaria problemas

de instabilidade em relação ao centro de massa dos objetos, advindos da própria BGE.

Em todos os testes, variamos o coeficiente de elasticidade do material da pintura do carro (*elasticity*), assumindo os valores 0, 0.1, 0.5 e 1.0, com o objetivo de identificar quais dos envoltórios e coeficientes de elasticidade levariam a resultados mais próximos aos obtidos na Seção V (pela avaliação do perito forense). O uso de diferentes coeficientes de elasticidade também teve o propósito de compensar o fato dos veículos não poderem ser modelados na BGE como corpos deformáveis, sendo considerados corpos rígidos.

Além disso, consideramos que a força aplicada foi 5000N (obtida empiricamente e suficiente para atingir a aceleração desejada, considerando-se as distâncias que os carros percorreriam até a colisão), a massa dos carros 2000kg, o coeficiente de atrito no asfalto 0.85 e a aceleração da gravidade  $9.8m/s^2$ . A força é aplicada continuamente, sendo constante até que o carro atinja a sua velocidade máxima, definida pelo gerador. Para efeitos de modelagem, no Estudo de Caso 1, as velocidades máximas usadas para restringir as forças aplicadas durante o *script* de dinâmica para os veículos azul e laranja foram 65,9 e 98,5km/h, respectivamente. Já no Estudo de Caso 2, o veículo laranja está parado (0km/h) e o azul tem a máxima de 89km/h.

TABELA I: PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO CASO 1

Sim	Collider	Elasticity	Nº Vértices	Vic1 km/h	Vic2 km/h
1	Convex	-	100	65,92	98,50
2	Convex	0,10	100	65,92	98,50
3	Convex	0,50	100	65,92	98,50
4	Convex	1,00	100	65,92	98,50
5	Convex	-	200	65,92	98,50
6	Convex	0,10	200	65,92	98,50
7	Convex	0,50	200	65,92	98,50
8	Convex	1,00	200	65,92	98,50
9	Convex	-	1000	65,92	98,50
10	Convex	0,10	1000	65,92	98,50
11	Convex	0,50	1000	65,92	98,50
12	Convex	1,00	1000	65,92	98,50
13	Box	-	100	65,92	98,50
14	Box	0,10	100	65,92	98,50
15	Box	0,50	100	65,92	98,50
16	Box	1,00	100	65,92	98,50

Na BGE, para gerar as simulações é necessário posicionar os geradores, configurar suas variáveis (como velocidade máxima e percurso) e posicionar os pontos de controle relativos aos percursos de cada gerador. O processo então se resume ao posicionamento destes dois objetos. Quando a simulação é executada, observamos se os veículos atingem as velocidades e colidem nas posições desejadas, caso contrário, repositamos os objetos e refazemos o teste até que a colisão aconteça nos pontos desejados e com as velocidades que queremos testar. Na Tabela I, detalhamos os parâmetros usados nas simulações do Estudo de Caso 1 e os valores numéricos

encontrados para as velocidades iniciais dos veículos (*Vic1* e *Vic2*). A partir desses valores, simulamos o deslocamento dos veículos, medido em metros (Tabelas II e III). A coluna Simulação representa o valor do deslocamento após os testes de simulação na BGE. A coluna Calculado representa o deslocamento calculado com base na velocidade inicial anterior à colisão, calculada na Seção V, usada na simulação.

TABELA II: DIFERENÇA ENTRE VALORES CALCULADOS E SIMULADOS PARA O VEÍCULO 1 NO ESTUDO DE CASO 1

Simulação		Calculado	Diferença (C-S)
Sim	Veículo c1 d(m)	Veículo c1 d(m)	Veículo c1 d(m)
1	15,04	13,00	-2,04
2	17,11	13,00	-4,11
3	19,33	13,00	-6,33
4	19,5	13,00	-6,50
5	4,8	13,00	8,20
6	4,56	13,00	8,44
7	4,21	13,00	8,79
8	3,4	13,00	9,60
9	3,82	13,00	9,18
10	3,78	13,00	9,22
11	3,76	13,00	9,24
12	2,63	13,00	10,37
13	2,78	13,00	10,22
14	2,87	13,00	10,13
15	2,73	13,00	10,27
16	0,94	13,00	12,06

TABELA III: DIFERENÇA ENTRE VALORES CALCULADOS E SIMULADOS PARA O VEÍCULO 2 NO ESTUDO DE CASO 1

Simulação		Calculado	Diferença (C-S)
Sim	Veículo c2 d(m)	Veículo c2 d(m)	Veículo c2 d(m)
1	11,46	21,00	9,54
2	11,46	21,00	9,54
3	11,92	21,00	9,08
4	9,94	21,00	11,06
5	31,61	21,00	-10,61
6	27,03	21,00	-6,03
7	34,15	21,00	-13,15
8	57,15	21,00	-36,15
9	32,65	21,00	-11,65
10	33,93	21,00	-12,93
11	31,44	21,00	-10,44
12	36,27	21,00	-15,27
13	22,33	21,00	-1,33
14	21,43	21,00	-0,43
15	22,71	21,00	-1,71
16	21,27	21,00	-0,27

A partir dos dados obtidos nas Tabelas II e III, a combinação para ambos os veículos que gerou o valor com menor desvio do Calculado (-2,04m no caso do veículo  $c_1$  e 9,54m no veículo  $c_2$ ) foi a Sim 1, com *convex hull composto* por 100 vértices e coeficiente de elasticidade zero, sendo esta simulação uma das candidatas como possível solução para a modelagem do Caso 1. Contudo, um coeficiente de elasticidade igual a zero para a superfície de contato do carro, representando uma colisão perfeitamente inelástica, não seria um valor idealmente realista para a modelagem da colisão dos veículos.

Um processo similar foi conduzido para o Estudo de Caso 2. Na Tabela IV, detalhamos os parâmetros utilizados nas simulações do Estudo de Caso 2, bem como os valores numéricos encontrados na Seção V, para as velocidades iniciais dos veículos (*Vic1 e Vic2*). Nas Tabelas V e VI, mostramos o resultado das simulações dos deslocamentos dos veículos em metros, relativos ao Estudo de Caso 2.

Para o Estudo de Caso 2, o resultado com o menor desvio do Calculado foi a Sim 2, com *convex hull* composto por 100 vértices e coeficiente de elasticidade igual a 0.1. Mais precisamente, no Estudo de Caso 2 obtivemos 2,42m e 3,27m, respectivamente, para os veículos  $c_1$  e  $c_2$ , sendo esta simulação uma das candidatas como possível solução para a modelagem do Caso 2.

TABELA IV: PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO CASO 2

Sim	Collider	Elasticity	Nº Vértices	Vic1 km/h	Vic2 km/h
1	Convex Hull (100)	-	100	89,00	-
2	Convex Hull (100)	0,10	100	89,00	-
3	Convex Hull (100)	0,50	100	89,00	-
4	Convex Hull (100)	1,00	100	89,00	-
5	Convex Hull (200)	-	200	89,00	-
6	Convex Hull (200)	0,10	200	89,00	-
7	Convex Hull (200)	0,50	200	89,00	-
8	Convex Hull (200)	1,00	200	89,00	-
9	Convex Hull (1000)	-	1000	89,00	-
10	Convex Hull (1000)	0,10	1000	89,00	-
11	Convex Hull (1000)	0,50	1000	89,00	-
12	Convex Hull (1000)	1,00	1000	89,00	-
13	Box (1000)	-	1000	89,00	-
14	Box (1000)	0,10	1000	89,00	-
15	Box (1000)	0,50	1000	89,00	-
16	Box (1000)	1,00	1000	89,00	-

Contudo, não somente as distâncias devem ser consideradas, mas também o vetor posição que caracteriza a localização final dos veículos após colidirem, em relação à área na qual se encontram, como retratado pelo perito nos diagramas mostrados nas Figs. 5 e 6.

Portanto, nas imagens que se seguem, exibidas na Fig. 7, mostramos 4 quadros principais para cada uma das animações

3D em forense que geramos com o nosso *serious game*, usando os melhores resultados obtidos nas simulações com a BGE, em cada um dos dois Estudos de Caso.

TABELA V: DIFERENÇA ENTRE VALORES CALCULADOS E SIMULADOS PARA O VEÍCULO 1 NO ESTUDO DE CASO 2

Simulação		Calculado	Diferença (C-S)
Sim	Veículo c1 d(m)	Veículo c1 d(m)	Veículo c1 d(m)
1	6,33	9,17	2,84
2	6,75	9,17	2,42
3	6,33	9,17	2,84
4	2,56	9,17	6,61
5	4,21	9,17	4,96
6	4,21	9,17	4,96
7	5,90	9,17	3,27
8	0,84	9,17	8,33
9	2,95	9,17	6,22
10	4,21	9,17	4,96
11	5,06	9,17	4,11
12	0,00	9,17	9,17
13	5,48	9,17	3,69
14	2,95	9,17	6,22
15	5,48	9,17	3,69
16	1,26	9,17	7,91

TABELA VI: DIFERENÇA ENTRE VALORES CALCULADOS E SIMULADOS PARA O VEÍCULO 2 NO ESTUDO DE CASO 2

Simulação		Calculado	Diferença (C-S)
Sim	Veículo c2 d(m)	Veículo c2 d(m)	Veículo c2 d(m)
1	5,48	9,17	3,69
2	5,90	9,17	3,27
3	5,90	9,17	3,27
4	9,70	9,17	- 0,53
5	5,48	9,17	3,69
6	5,48	9,17	3,69
7	8,01	9,17	1,16
8	18,54	9,17	- 9,37
9	4,21	9,17	4,96
10	5,48	9,17	3,69
11	6,32	9,17	2,85
12	18,54	9,17	- 9,37
13	4,21	9,17	4,96
14	4,21	9,17	4,96
15	6,74	9,17	2,43
16	16,44	9,17	- 7,27

Nessas animações 3D, as simulações candidatas como possíveis soluções para as modelagens dos Casos 1 e 2 são as geradas, em ambos os casos, pela Sim 10 (*convex hull* com 1000 vértices e coeficiente de elasticidade 0.1).

Mais especificamente, estas geram um posicionamento final dos veículos, após o choque, com maior grau de

similaridade aos dos croquis produzidos pelo perito, embora os valores de desvio do Calculado sejam 9,22m e 12,93m no Estudo de Caso 1 para os veículos  $c_1$  e  $c_2$ , respectivamente; e 4,96m e 3,69m no Estudo de Caso 2, para os veículos  $c_1$  e  $c_2$ , respectivamente.

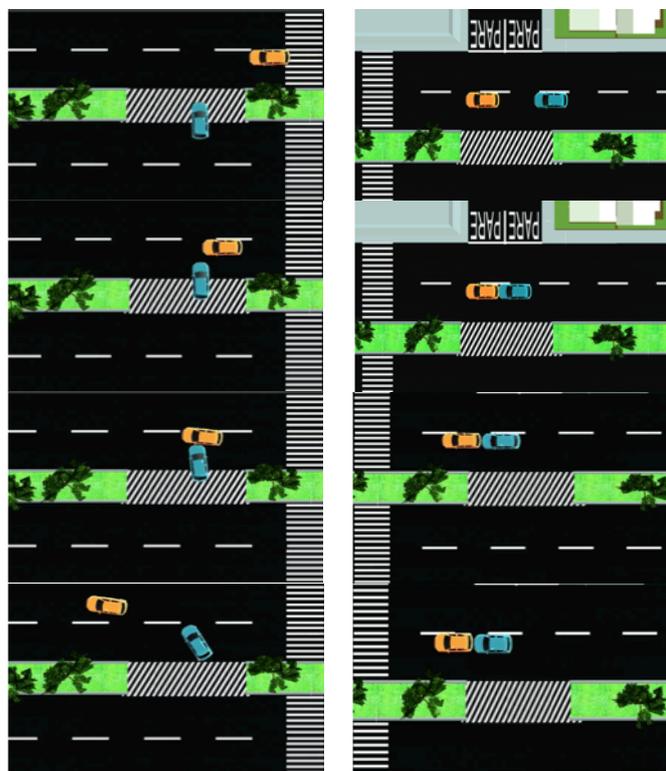


Fig. 7. Quatro quadros principais das animações 3D geradas no jogo com a BGE são mostrados de cima para baixo. Na coluna da esquerda, relativos ao Caso 1 e, na coluna da direita, ao Caso 2.

## VII. DISCUSSÃO

Neste trabalho, no ambiente de um *serious game* que implementamos usando a BGE, reconstruímos dois acidentes de trânsito envolvendo veículos, por meio de visualizações interativas 3D e simulações de dinâmica em forense. No geral, os resultados gerados no ambiente do nosso jogo foram bastante positivos.

Considerando as três simulações candidatas como possível solução para as modelagens dos Estudos de Caso 1 e 2 (Sim 1, Sim 2 e Sim 10) e o fato dos carros serem idênticos, a combinação que apresentou os melhores resultados em termos de coerência visual e posicionamento vetorial após o choque, para ambos os Estudos de Caso, foi a que usou *convex hull* com 1000 vértices e *elasticity* 0.1, ou seja, a Sim 10. Em termos de menor distância entre os valores Calculados e Simulados foram as Sim 1 e Sim 2, para os Estudos de Caso 1 e 2, respectivamente. Muito provavelmente, a solução ideal encontra-se nesse intervalo de opções, estimulando que testes sistemáticos em trabalhos futuros sejam conduzidos com a BGE e com outra *engine* física, talvez mais robusta, para que a

indicação precisa da solução mais próxima ao fato seja identificada com um grau de confiabilidade maior.

Constatamos na prática que, mesmo em situações de colisão bastante comuns entre veículos e, aparentemente não tão complexas de serem modeladas, o grande número de variáveis existentes, por si só, já representa um grande desafio, tanto para o trabalho de avaliação do perito, quanto para a geração de animações em forense. A presença eventual de obstáculos adicionais na pista (outros veículos, meio-fio, árvores, canteiros, objetos, etc.) ou a variância nos coeficientes de atrito das vias, aerodinâmica do veículo, resistência dos materiais e até buracos e imperfeições no asfalto, também são elementos relevantes para os cálculos realizados pela *engine* física. Fatores humanos, como ações e reações dos condutores, momentos antes do incidente, também são importantes para a modelagem. Contudo, esses elementos não são nada triviais de serem obtidos e, muitas vezes, são ignorados, conduzindo a simulações cujas animações nem sempre correlacionam-se fortemente à avaliação conduzida, de forma tradicional pelo perito.

Assim, as simulações são limitadas por um lado, pela capacidade do perito e dos profissionais da computação em representar na BGE o ambiente de colisão real (com base nas evidências e testemunhos somente) e, por outro, às próprias limitações para modelagem física de colisões da BGE, já que não implementa deformação e o centro de massa do objeto não coincide exatamente com o de um veículo real.

O centro de massa é um parâmetro importante, pois é usado pela BGE como ponto de referência para o envoltório *collider*. Em relação à deformação, em nossas simulações, grande parte da energia do sistema seria dissipada pelo efeito de deformação na colisão. Como a BGE não contempla objetos deformáveis, simulamos parcialmente esse efeito alterando os valores da propriedade *elasticity*. Vale ressaltar que, apesar da deformação dos veículos não ter sido representada nas animações 3D, esta também não está presente nos cálculos apresentados pelo perito forense, ou seja, ambas as modelagens podem ser melhoradas.

Para finalizar, este trabalho tem potencial para evoluir para uma ferramenta bastante útil em *serious games* para gerar visualizações 3D interativas em forense, na forma de animações. Essas informações poderiam também ser úteis perante o júri, durante o levantamento das possíveis formas de ocorrência de uma colisão entre veículos. Contudo, diferente da reconstrução física tradicional, as simulações por computador (numéricas e 3D) ainda têm sido recebidas pela área forense com muita cautela. Portanto, é fundamental, para todas as partes envolvidas, que haja total transparência no processo. Isto inclui um detalhamento completo e amigável das funcionalidades e sistemas computacionais usados, da modelagem realizada nas simulações, do método e rigor científico empregado, etc. Desta forma, convergindo para colaborativamente delinear um intervalo de confiabilidade nas simulações (numericamente e graficamente condizentes com o ocorrido em 3D), frente às análises baseadas em cálculos da física e croquis, produzidas pelo perito.

## AGRADECIMENTOS

Daniel Valente Macedo gostaria de agradecer à CAPES, Yvens Rebouças Serpa e Maria Andréia Formico Rodrigues ao CNPq (Processos No. 157.257/2012-6 e No. 310434/2010-6, respectivamente) e Ygor Rebouças Serpa à FUNCAP-CE (Processo No. 0074 - 00006.01.40/13), pelo apoio financeiro recebido.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Se e P. Jasiobedzk, “Instant scene modeler for crime scene reconstruction”, In Proceedings of the 2005 IEEE Workshop on Advanced 3D Imaging for Safety and Security (A3DISS'05), San Diego, USA, June, 2005.
- [2] N. Hussin, D. Schofield, M. T. Shalaby, “Visualising information: evidence analysis for computer-generated animation (CGA)”, In Proceedings of the Eighth International Conference on Information Visualisation (IV'04), pp. 903-908, 2004.
- [3] M. J. Mahoney, “Computer animation and simulation in the courtroom”, pp. 1-10. Disponível em <http://www.harringtonmahoney.com/publications>.
- [4] M. Tozser, N. Sultanum, E. Sharlin, K. Rutherford, C. Foster, “Re-collision: a collision reconstruction forensics tabletop interface”, In Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 81-84, ACM Press, 2012.
- [5] M. I. Cabellos e E. E. Pérez, “Energía de absorción para calcular la velocidad de impacto en accidentes de tránsito”, Revista de la Red Semilleros de Investigación de Santander, vol.1 (1), 2012.
- [6] M. T. Shalaby, N. Hussin, D. Schofield, “Forensic animation: measuring the reliability and accuracy of computer generated animation used in the courtroom”, In Proceedings of the Seventh International Conference on Information Visualization (IV'09), pp. 606-611, IEEE CS Press, 2003.
- [7] D. V. Macedo, Yvens R. Serpa, Ygor R. Serpa, A. P. Abreu, M. A. F. Rodrigues, “IntEducaTrânsito: um jogo 3D interativo e educativo sobre as normas de trânsito controlado por dispositivos não tradicionais”, Em Anais do 12<sup>th</sup> SBGames, Trilha de Arte & Design, 2013.
- [8] Blender.org Blender Game Engine (BGE). Disponível em: <http://wiki.blender.org/index.php/Doc:2.6/Manual/GameEngine>.
- [9] E. St. Clair, A. Maloney, A. Schade III, “An introduction to building 3D crime scene models using SketchUp”, Journal Association Crime Scene Reconstruction, vol.18(4), pp. 29-47, 2012.
- [10] A. P. Gee, P. J. Escamilla-Ambrosio, M. Webb, W. Mayol-Cuevas, A. Calway, “Augmented crime scenes: virtual annotation of physical environments for forensic investigation”, In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ACM Workshop on Multimedia in Forensics, Security and Intelligence (MiFor'10), pp. 105-110, ACM, NY, USA, 2010.
- [11] F. Xu, D. Liu, D. Shan, H. Yang, “Visual simulation of crime scene based on OpenGL performer”, In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Information Science and Engineering (ICISE'09), pp. 5287-5290, Nanjing, China, 2009.
- [12] Unity Technologies. Unity. Disponível em: <http://unity3d.com/>.
- [13] Id Tech 4. Doom 3 engine. Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Id\\_Tech\\_4](http://en.wikipedia.org/wiki/Id_Tech_4).
- [14] OGRE 3D. Open source graphics engine. Disponível em: <http://www.ogre3d.org/>.
- [15] R. Andreoli, R. de Chiara, U. Erra, V. Scarano, “Interactive 3D environments by using videogame engines”, In Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation, pp. 515-520, July 2005.
- [16] P. S. Paul, S. Goon, A. Bhattacharya, “History and comparative study of modern game engines”, International Journal of Advanced Computer and Mathematical Sciences, vol. 3(2), pp. 245-249, 2012.
- [17] Crytek. Cry engine 3. Disponível em: <http://www.crytek.com/cryengine/>.
- [18] Epic Games. Unreal technology. Disponível em: <http://www.unrealengine.com/>.
- [19] M. Fairuz, “Utilizing a 3D game engine to develop a virtual design review system”, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), vol. 16, pp. 39-68, January, 2011.
- [20] J. Craighead, J. Burke, R. Murphy, “Using the Unity game engine to develop SARGE: a case study”, In Proceedings of the 2008 Simulation Workshop at the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'08), September 2008.
- [21] Smart Driver. Disponível em: <http://www.joguegratis.com.br/jogos-educativos/smartdriver/>.
- [22] G. A. de Assis, I. K. Ficheman, A. G. D. Corrêa, M. Lobo Netto, R. D. Lopes, “EducaTrans: um jogo educativo para o aprendizado do trânsito”, Revista Renote - Novas Tecnologias na Educação, CINTED, vol. 4(2), UFRGS, Dezembro, 2006.
- [23] Thinkbox Games. VRUM. Disponível em: <http://www.jogovrum.com.br/>.
- [24] City Car Driving. Disponível em <http://citycardriving.com/>.
- [25] J. Dias, R. Portal, T. Paulino, “Forensic injury biomechanics methodologies applied to traffic accident reconstruction”, Journal of Biomechanics, vol. 45, Supplement 1, pp. S210, Elsevier Ltd., July 2012.
- [26] C Hellingman, “Newton’s third law revisited”, Phys. Educ, vol. 27: pp. 112–115, 1992.
- [27] Newton. Principia, Corollary III to the laws of motion.
- [28] CTB. Código de trânsito brasileiro. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19503.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503.htm).