

Metodologia de Estimativa de Dano Colateral por Elementos Finitos

Jean Marcel Knapp dos Santos – Cap¹, Murilo Grassi Salvatti – Cel²

Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE), Brasília/DF – Brasil
Base Aérea de Campo Grande (BACG), Campo Grande/MS – Brasil

Resumo – A proposta de Metodologia de Estimativa de Dano Colateral por Elementos Finitos combina a discretização geométrica de áreas ou objetos colaterais com análise probabilística determinística, permitindo calcular o risco de dano colateral de forma rápida e precisa. Por meio da construção de Áreas de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral baseadas em raios de dano e em distribuição normal bivariada de impactos, o método substitui a simulação Monte Carlo, reduzindo o tempo de processamento de segundos para milissegundos. Dessa forma, oferece ao planejador militar critérios objetivos para o teste de proporcionalidade, assegurando consistência metodológica e agilidade na tomada de decisão operacional, em conformidade com o Direito Internacional dos Conflitos Armados.

Palavras-Chave – Estimativa de Dano Colateral, Sistemas de Armas, Direito Internacional dos Conflitos Armados.

I. INTRODUÇÃO

As regras de engajamento em operações conduzidas por forças armadas traduzem em práticas concretas o arcabouço jurídico e político aplicável, sem prejudicar o direito à legítima defesa, o qual segue as normas nacionais de cada Estado [1].

Essas regras estabelecem limites claros para o uso da força e incluem, em seus mandatos, as autorizações específicas para ações ofensivas. Esse conceito fornece diretrizes para evitar e minimizar danos colaterais, atendendo às preocupações do Estado e aos imperativos do Direito Internacional dos Conflitos Armados [1] [2].

Pouca consideração em relação a dano colateral influencia na aceitação pública e na opinião da mídia a respeito de uma operação militar e pode aumentar o risco de uma derrota estratégica, enquanto muita consideração pode comprometer o sucesso de cada missão ao limitar excessivamente o uso dos sistemas de armas.

Este artigo tem por objetivo propor uma Metodologia de Estimativa de Dano Colateral (CDEM) que utilize elementos finitos para calcular a probabilidade de uma Área ou Objeto Colateral sofrer dano oriundo do lançamento de armamentos explosivos contra um alvo.

Essa metodologia proporciona ao planejador uma medida probabilística para estimar os intervalos de tempo no decorrer de uma operação militar em que é mais provável ocorrer um dano colateral, de forma a minimizar danos colaterais em operações militares sem comprometer a capacidade de causar dano aos alvos selecionados.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Durante o planejamento e execução de um conflito armado, os tomadores de decisão precisam se preocupar em atingir os fins políticos por meio do cumprimento dos objetivos

militares, mas com atenção à mitigação de Danos Colaterais [1].

A. Definições

Dano colateral: Perda não intencional ou incidental de vidas ou lesões a pessoas civis ou ex-combatentes, danos a equipamentos ou instalações civis não sendo utilizadas em apoio às hostilidades [1]. Apesar de não ser coberto pelo Direito Internacional dos Conflitos Armados (DICA), também pode ser considerado dano colateral, para o efeito de planejamento, não só pessoas, equipamentos e instalações, como também combatentes aliados e seus equipamentos.

Área ou Objeto Colateral (CDRO): Em inglês, *Collateral Damage Risk Object*, são quaisquer construções ou objetos civis não caracterizados como alvos militares legítimos sob a ótica do DICA [1].

Distância de Efeito Colateral (CER): Em inglês, *Collateral Effects Radius*, representa a maior distância que uma cabeça de guerra possa causar um dano colateral, dados os critérios de dano estabelecidos [1]. Para a aplicação da metodologia proposta, este conceito despreza quaisquer erros de precisão de lançamento, pois a variável de erro será considerada independente do CER, como será explicado posteriormente.

Alvo: Combatentes e seus equipamentos, instalações militares ou infraestrutura civil utilizada diretamente em apoio às hostilidades e contra o qual se podem direcionar atividades letais e/ou não letais para produzir efeitos físicos específicos (destruição, captura ou neutralização), ou ainda não físicos (psicológicos) [1].

Estimativa de Dano Colateral (CDE): Em inglês, *Collateral Damage Estimate*, é um cálculo aproximado dos potenciais danos colaterais obtido por meio de análise prévia ao engajamento do alvo. Para a metodologia proposta, será a probabilidade de um CDRO sofrer um dano colateral oriundo de um ataque aéreo [1].

Metodologia de Estimativa de Danos Colaterais (CDEM): Em inglês, *Collateral Damage Estimate Methodology*, é um conjunto de normas, métodos, técnicas e processos conjuntos para realizar análises de danos colaterais e produzir estimativas de danos colaterais [1].

B. Metodologia de Estimativa de Dano Colateral (CDEM)

O CDEM é fundamental para apoiar o teste de proporcionalidade, no qual o planejador avalia se os danos colaterais estimados seriam excessivos em relação à vantagem militar direta obtida. Para isso, o CDEM deve oferecer previsões suficientemente precisas dos níveis de danos colaterais esperados, utilizando ferramentas e metodologias padronizadas sempre que possível, a fim de manter a unidade

Cap. Jean Marcel Knapp dos Santos, knapp@ita.br; Cel. Murilo Grassi Salvatti, salvattims@fab.mil.br.

de esforço e a eficácia operacional, ainda que questões legais específicas sejam definidas nacionalmente [1].

O processo de *CDEM* internacionalmente adota uma abordagem em “camadas” (*tiering*), em que cada nível reflete um grau crescente de risco de danos colaterais mensurável pelos próprios instrumentos de análise, operados por pessoal habilitado. Esses mesmos instrumentos também permitem mitigar riscos, modelando variáveis do ataque – como parâmetros de emprego (direção de ataque, espoletagem, etc.), momento da ação (por exemplo, à noite, quando o alvo está desocupado), armamento e proximidade de outras estruturas ou civis [1].

C. Probabilidade de acerto

Quando alvos ou *CDROs* são simplificados a estruturas retangulares ou circulares, os métodos convencionais de cálculo de área e dimensões de retângulos e círculos podem ser aplicados, e os cálculos de probabilidade de acerto de um armamento são facilmente definidos. Mas com isso, surgem novas limitações para que o cálculo seja possível, seja em relação à direção de ataque, à precisão de acerto do sistema de armas ou ainda ao modo de lançamento do armamento [3].

Além disso, os alvos podem ter qualquer geometria, não só retangular ou circular, e os parâmetros de emprego e características do sistema de armas nem sempre são simplificáveis [3].

A probabilidade de acertar um armamento lançado contra um alvo, ou SSP_H , pode ser calculada com base em uma área efetiva para estimar o efeito de impactos com distância inferior ao raio de efeito de dano do armamento.

O SSP_H para alvos retangulares corresponde a uma distribuição normal bivariada, cujas variáveis são, por hipótese, independentes. O SSP_H é calculado usando (1), sendo x a distância longitudinal do impacto ao ponto desejado de impacto (*DPI*) e y a distância latitudinal [4].

$$SSP_H = \text{erf}\left(\frac{\Phi^{-1}(0,75) \times x}{2\sqrt{2} \times DEP}\right) \times \text{erf}\left(\frac{\Phi^{-1}(0,75) \times y}{2\sqrt{2} \times REP}\right) \quad (1)$$

O raciocínio por trás de um SSP_H para alvos pode ser estendido para um *CDRO*. Todavia, dificilmente uma área efetiva de um *CDRO* será retangular, seja em virtude da geometria do alvo, pelo próprio efeito radial da expansão de uma onda de sopro ou de um envelope de fragmentação, ou pela distribuição de impactos do armamento lançado em rastilho.

Não só isso, mas utilizar (1) para uma *CDRO* sem transformações matemáticas é inviável, pois a mira do sistema de armas não estará centralizada nele, mas no alvo. A equação acima portanto, utilizada por si só, não é suficiente para calcular o CDE de um ataque.

Na Fig. 1, por exemplo, é possível observar um alvo de geometria circular (circunferência preta) cuja área efetiva (polígono tracejado na cor vermelha) se assemelha a um retângulo de arestas arredondadas. Também se observa que o lançamento de quatro armamentos (circunferências rosas) em rastilho. Para cada armamento, seria necessário um cálculo individual de probabilidade de acerto.

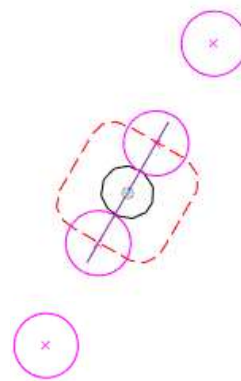


Fig. 1 - Exemplo de área efetiva e lançamento de armamento em rastilho.

D. Elementos finitos

O método dos elementos finitos é um método numérico que envolve a discretização de um problema por meio de um espaço de funções de dimensão finita. Esses espaços de funções são comumente definidos usando um elemento finito em uma célula de referência para derivar as funções de base do espaço [5].

Por exemplo, um círculo, ou qualquer outra forma geométrica plana, pode ser dividida em uma grade de pequenos retângulos, como pode ser observado na Fig. 2.

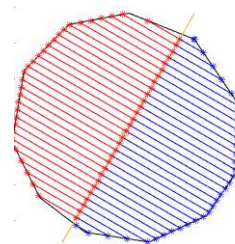


Fig. 2 - Exemplo de elementos finitos aplicados a um círculo

Essa discretização em pequenos retângulos pode ser utilizada para que equações, como (1), que tomem um retângulo como parâmetro de entrada possam ser utilizadas.

III. METODOLOGIA

Uma forma intuitiva de calcular a Estimativa de Dano Colateral é por meio de simulação Monte Carlo. Dado um polígono que represente a Área ou Objeto Colateral (*CDRO*) no plano horizontal, simula-se o lançamento de armamentos com base na precisão do sistema de armas e, para cada impacto de armamento calculado, observa-se se o círculo que representa o alcance do efeito de dano do armamento intersecta o polígono que representa o *CDRO* no plano horizontal, conforme representado na Fig. 3. São contados quantos eventos ocorrem em relação ao total de eventos da amostra e tem-se a probabilidade.

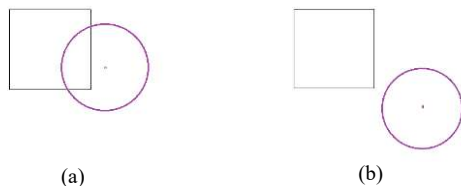


Fig. 3 – (a) Evento em que ocorre interseção entre o polígono que representa o efeito do armamento e o CDRO; (b) Evento em que não ocorre interseção.

Como será visto nos resultados, tal metodologia, apesar de ter um tempo de execução aceitável para uma análise individual, não é escalável.

Uma forma determinística de calcular o *CDE* é incorporar o raio de efeito do armamento ao polígono que representa o *CDRO*, bem como o rastilho de armamentos lançados. Esse polígono então é dividido em uma grade de elementos finitos e calcula-se a probabilidade de que um armamento lançado contra um alvo acerte cada elemento finito construído, como será visto a seguir.

A. Distância de Efeito Colateral (CER)

Construções possuem maior vulnerabilidade ao efeito de sopro. Pessoas, apesar de serem vulneráveis ao efeito de sopro, sob a ótica defensiva, são mais vulneráveis ao efeito de fragmentação [4]. Cada *CDRO* deve ter modelada sua resistência à sobrepressão e à penetração ou perfuração por fragmentos.

Picos de sobrepressão de 1 a 1,5kPa já são suficientes para quebra de vidraças; 7,5 a 12kPa são suficientes para causarem falhas em paredes de concreto; enquanto 70 a 80kPa são suficientes para causarem a destruição de todas as construções [6]. Esses critérios de dano foram selecionados como uma base para definir danos “leves”, “médios” ou “graves”.

Quanto à fragmentação, fragmentos que atinjam pessoas com energia até 0.1kJ resultam em danos leves ($Pd/h = 0,1$); até 1kJ resultam em danos moderados ($Pd/h = 0,5$); enquanto até 4kJ resultam em danos graves ($Pd/h = 0,9$) [7].

Essas medidas podem ser utilizadas para obter a distância radial que a onda de sopro percorre após a detonação do armamento para que atinja o *CDRO* com os picos de sobrepressão citados, ou a distância horizontal que os fragmentos oriundos da detonação do armamento percorrem e atingem o *CDRO* com as energias mencionadas anteriormente. Essa distância será a Distância de Efeito Colateral (*CER*).

B. Área de Exclusão de Efeito Colateral

Existem duas formas de avaliar a interação entre a explosão de um armamento e um *CDRO*. Uma delas é considerar o alvo como um ponto e os efeitos da explosão do armamento como uma área, conforme Fig. 4a, ou então considerar uma área eficaz em torno de um alvo e o armamento como um ponto, conforme Fig. 4b [4].

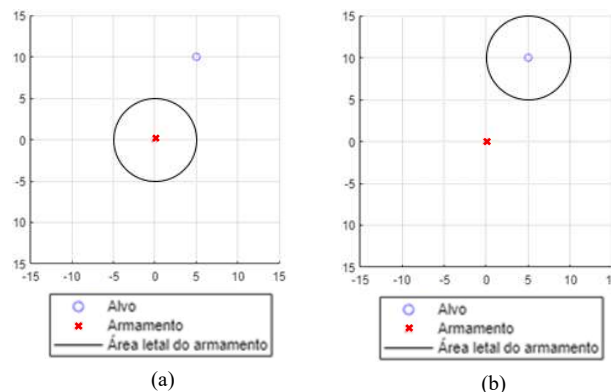


Fig. 4 - (a) Área letal do armamento ao redor do armamento; (b) Área letal do armamento ao redor do alvo

Essa dualidade traz vantagens no cálculo de estimativa de dano. Uma vez que os alvos geralmente possuem dimensões significativamente maiores que os armamentos, é mais vantajoso considerar o efeito do armamento ao redor de um alvo bidimensional do que considerar um alvo pontual ao redor de uma detonação, pois essa área pode ser expandida em função das dimensões do alvo, da separação entre impactos de armamentos lançados em série e da quantidade destes e da distância de eficácia do armamento [8].

Com base no raio de efeito do armamento, o polígono que representa o *CDRO* pode ser “inflado”, de forma que seja formado um novo polígono cujos pontos do contorno estejam a uma distância em relação ao polígono original igual à Distância de Efeito Colateral.

Esse novo polígono passa a ser denominado Área de Exclusão de Efeito Colateral, representado em vermelho na Fig. 5, ao redor de um *CDRO* de geometria quadrilátera no plano horizontal.

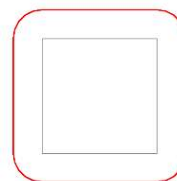


Fig. 5 – Exemplo de Área de Exclusão de Efeito Colateral

O significado dessa região é que se espera que ocorra dano colateral no *CDRO* apenas caso haja a detonação do armamento dentro dessa região. Em suma, o objetivo do planejador é que não ocorra a detonação de armamentos dentro de uma Área de Exclusão de Efeito Colateral.

C. Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral

Alguns sistemas de armas são projetados para lançar o armamento em rastilho, ou seja, múltiplos lançamentos de armamentos em um único sobrevoo ao alvo [4]. Isso é feito para que, caso um armamento caia antes do alvo, o armamento subsequente possa atingi-lo, aumentando a probabilidade de sucesso, conforme observado na Fig. 1.

Utilizando um raciocínio semelhante ao da construção da Área de Exclusão de Efeito Colateral, ao invés de pensar em termos probabilísticos fazendo o relacionamento de cada

ponto de impacto desejado com a Área de Exclusão de Efeito Colateral, conforme ilustrado na Fig. 6a, tal área pode ser replicada pelo número de armamentos lançados de uma vez, com um *offset* igual ao intervalo entre cada ponto de impacto desejado, e posteriormente mescladas em um único polígono ou grupo de polígonos, conforme ilustrado na Fig. 6b.

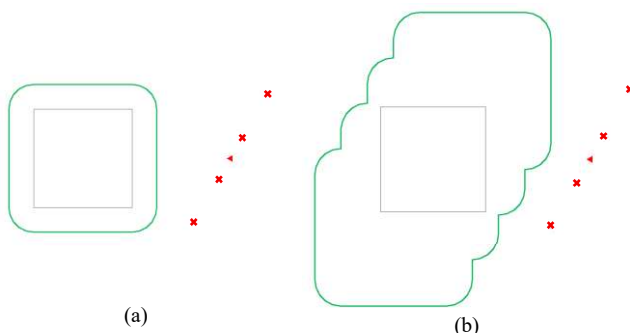


Fig. 6 – Exemplo de Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral

Esse novo polígono ou grupo de polígonos passa a ser denominado Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral, representado em verde na Fig. 6b, ao redor de um *CDRO* de geometria quadrilátera (no exemplo) no plano horizontal.

O significado dessa região é que, caso o ponto médio dos impactos de armamentos lançados em rastilho esteja no interior desse polígono (ou grupo de polígonos), pode se assumir que ao menos um dos armamentos detonará dentro da Área de Exclusão de Efeito Colateral e, por consequência, assume-se que haverá dano colateral.

Isso é vantajoso porque, ao invés de pensar em interações probabilísticas entre polígonos (região de efeito do armamento x alvo), passa-se a analisar a probabilidade de um ponto (ponto médio de impacto) estar dentro de um polígono (Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral), tal relação já modelada, com equações consagradas, como (1).

D. Estimativa de Dano Colateral (CDE)

Neste modelo, assume-se uma distribuição normal bivariada para os pontos de impacto, prática padrão em modelos de *weaponneering* [4].

Uma vez expandida a região que delimita o *CDRO* no plano horizontal para uma Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral, essa área pode ser dividida em elementos finitos, conforme a Fig. 7.

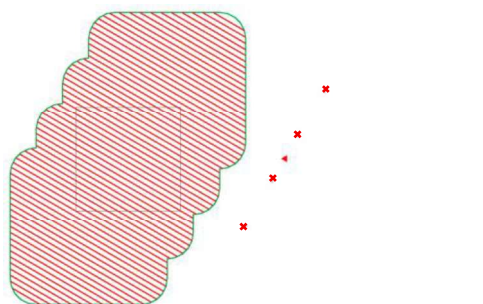


Fig. 7 – Elementos Finitos aplicados a uma Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral

Essa técnica foi computacionalmente descrita em trabalhos anteriores [3]. A metodologia se resume a traçar uma reta paralela à direção de ataque e que passe pelo ponto médio de impactos desejado (triângulo vermelho da Fig. 7). A partir dessa reta, são traçadas retas perpendiculares a ela e são buscadas todas as interseções com o polígono da Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral. Essas interseções são ordenadas e são construídos elementos finitos na forma de retângulos. É calculada então a probabilidade de impacto do armamento dentro de cada retângulo da grade e, ao final, as probabilidades são somadas, obtendo um *CDE* de forma determinística.

E. Escolha do risco de exposição aceitável

É difícil compreender a diferença entre um risco de dano de 10%, 1%, 0,1% ou 0,01%. O responsável por autorizar o ataque, dada a oportunidade, tenderá a minimizar ao máximo o risco de exposição, por vezes sem necessidade. Propõe-se então que a decisão não seja baseada no *CDE* propriamente dito, mas a partir de quantos dias pode se assumir que haverá dano colateral, com certo *confidence level*, ou em até quantos dias pode se assumir que não haverá dano colateral, também com certo *confidence level*.

A quantidade de dias de operação n que resulta em determinada probabilidade de haver dano colateral P é matematicamente dada por (2), sendo s o número diário de sortidas, *CDE* o risco de exposição aceitável.

$$n = \frac{\log(P)}{\log(1 - CDE) \times s} \quad (2)$$

Trabalhando com um *confidence level* de 95%, é possível estabelecer um intervalo de tempo em que deve ocorrer um dano colateral, dado por (3).

$$\frac{\log(0,95)}{\log(1 - CDE)} \leq n \times s \leq \frac{\log(0,05)}{\log(1 - CDE)} \quad (3)$$

F. Mitigação do risco de exposição de Dano Colateral

A metodologia de mitigação do *CDE* pode ter diferentes complexidades para cada beligerante. Todavia, pode ser basicamente estruturada em quatro níveis progressivos, cada um com critérios específicos para avaliar e mitigar os riscos de danos colaterais:

Nível 1: Há modalidades de emprego com o esforço mínimo que atendam às necessidades operacionais, à probabilidade de sucesso mínima da missão e ao *CDE* máximo aceitável. Não é necessária mitigação e o ataque pode ser realizado.

Nível 2: Não há modalidades no esforço mínimo que atendam às necessidades operacionais, à probabilidade de sucesso mínima desejada e ao *CDE* máximo aceitável. É necessária a redução do *CDE*, em detrimento do perfil ótimo de emprego, que naturalmente resultará em um aumento do esforço necessário para atender a probabilidade de sucesso mínima. Isso porque as medidas necessárias para mitigar o

dano seria modificar a direção de ataque, por exemplo, o que pode exigir um aumento do planejamento do número de sortidas para obter a probabilidade de sucesso desejada; outra opção seria modificar a espoletagem do armamento, o que, por consequência, talvez exija que mais armamentos sejam lançados.

Nível 3: As modalidades, mesmo no esforço máximo para atender às necessidades operacionais e à probabilidade de sucesso mínima, ainda ultrapassam o *CDE* máximo. É necessária a redução do *CDE*, relevando a probabilidade de sucesso mínima da missão. Isso seria feito reduzindo o número de sortidas ou de armamentos lançados e, por consequência, reduzindo a probabilidade de sucesso da missão.

Nível 4: Não há modalidade de emprego com *CDE* inferior ao máximo aceitável. O dano colateral é esperado. Isso porque é possível que um *CDRO* esteja tão próximo ao Alvo que não haja armamento que, mesmo detonado sem erro de pontaria ao ser lançado sobre o alvo e de forma isolada, ainda causaria efeitos de dano no *CDRO*.

IV. RESULTADOS

A. Distâncias de Efeitos Colaterais

As tabelas a seguir foram construídas com base na metodologia proposta e podem ser usadas como *rule of thumb* para estimativa de dano colateral dos armamentos. Caso haja tempo e recursos disponíveis, é ideal que seja feita uma análise mais específica para cada combinação alvo-armamento.

TABELA I - DISTÂNCIA DE EFEITO COLATERAL PARA CONSTRUÇÕES CIVIS

ARMAMENTO	Danos leves	Danos moderados	Danos graves
HYDRA-70	50 m	13 m	3 m
MK-81	200 m	53 m	12 m
MK-82	250 m	66 m	15 m
MK-83	330 m	87 m	20 m
MK-84	450 m	120 m	27 m

Os valores obtidos na Tabela I foram calculados com base no efeito de sopro considerando uma sobrepressão incidente limite de 1kPa para danos leves, 7,5kPa para danos moderados e 70kPa para danos graves.

TABELA II - DISTÂNCIA DE EFEITO COLATERAL PARA PESSOAS DESABRIGADAS

ARMAMENTO	Danos leves	Danos moderados	Danos graves
HYDRA-70	192 m	117 m	72 m
MK-81	172 m	105 m	65 m
MK-82	210 m	131 m	85 m
MK-83	335 m	229 m	164 m
MK-84	375 m	259 m	190 m

Os valores obtidos na Tabela II foram calculados com base no efeito de fragmentação considerando uma energia de impacto de fragmentos limite de 0,1kJ para danos leves, 1kJ para danos moderados e 4kJ para danos graves.

B. Estimativa de Dano Colateral (CER)

De forma a facilitar a visualização do problema, na Fig. 8 é ilustrado o cálculo do *CDE* por simulação Monte Carlo. Os pontos vermelhos representam armamentos que caíram a uma

distância superior à Distância de Efeito Colateral (*CER*), e os pontos verdes representam armamentos que caíram abaixo da distância limite.

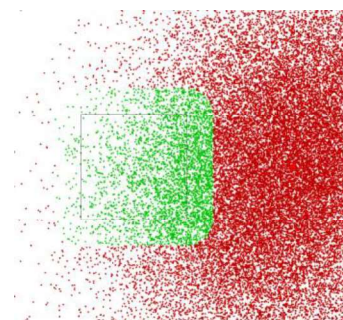


Fig. 8 – Simulação Monte Carlo dos pontos de impacto de lançamento de armamento em rastilho interagindo com uma *CDRO*

E de forma a provar que a Área de Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral é de fato o que foi ilustrado na Fig. 8, na Fig. 9 são ilustrados os pontos médios de impacto, aonde os pontos vermelhos representam os pontos médios de impacto em que armamento algum caiu a uma distância inferior ao *CER*, e os pontos verdes representam os pontos médios de impacto em que ao menos um armamento caiu abaixo da distância limite.

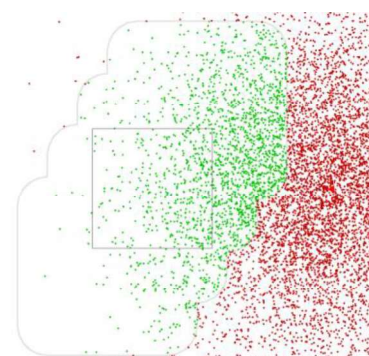


Fig. 9 – Simulação Monte Carlo dos pontos médios de impacto de lançamento de armamento em rastilho interagindo com uma *CDRO*

É possível observar a semelhança entre o polígono formado na Fig. 8 e os pontos verdes na Fig. 9.

Para uma simulação de 1.000.000 de lançamentos de rastilhos de 4 armamentos, intervalados em 10 metros, com uma inclinação de 30 graus no plano horizontal, para um *CDRO* quadrilátero afastado 30m lateralmente, obteve-se um *CDE* de 21,48%, com um tempo de processamento de aproximadamente 2326ms em um PC com processador de 2.30 GHz. A mesma análise, feita por elementos finitos, forneceu um *CDE* de 21,49% em 3ms. Resultados semelhantes de *CDE* nos métodos de Monte Carlo e elementos finitos foram obtidos em outros testes, e sempre com a vantagem de tempo de processamento para o método de elementos finitos.

B. Escolha do risco de exposição aceitável

De forma a tornar mais evidente o efeito que um determinado risco de exposição de *CDROs* teria em uma campanha, e com base em (3), foi elaborado um diagrama (Fig. 10) que prevê a partir de quanto tempo é esperada a ocorrência

de dano colateral e qual o tempo máximo para ela ocorrer, com *confidence level* de 95%.

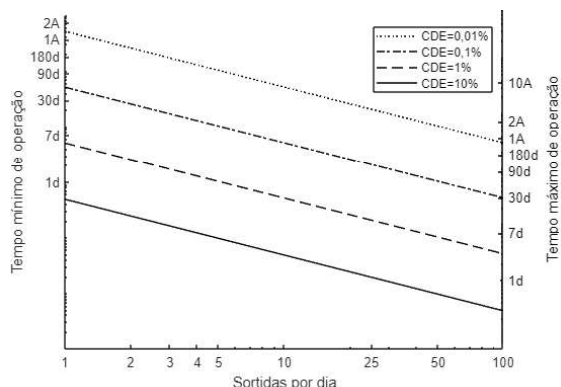


Fig. 10 – Estimativa de tempo de operação sem intercorrência de dano colateral ($C_D = 95\%$)

Por exemplo, caso seja estabelecido o risco de exposição de 0,1%, com 10 sortidas por dia, espera-se que não haja dano colateral com menos de cerca de cinco dias de operação, porém há boa certeza de que ocorrerá algum evento dentro de um ano, conforme plotado na Fig. 11a.

Já se for estabelecido o risco de exposição de 0,01%, com 10 sortidas por dia, espera-se que não haja dano colateral com menos de cerca de cinquenta dias de operação, porém há boa certeza de que ocorrerá algum evento dentro de dez anos, conforme plotado na Fig. 11b.

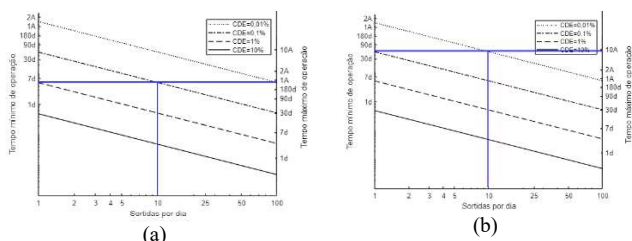


Fig. 11 – (a) Estimativa de tempo de operação sem intercorrência de dano colateral com 10 sortidas por dia e EDC = 0,1% ($C_L = 95\%$); e (b) com EDC = 0,01%

Com isso, é possível definir o risco de exposição aceitável com base na expectativa de duração de uma operação militar e no intervalo aceitável entre intercorrências de dano colateral.

Uma primeira interpretação é que, nos exemplos supracitados, o $CDE = 0,1\%$ atende uma operação que tenha a previsão de durar no máximo uma semana com baixa probabilidade de ocorrer dano colateral, caso deseje-se evitá-lo a todo custo. Já para uma operação de um mês, seria necessário um $CDE = 0,01\%$.

Uma segunda interpretação é que, com $CDE = 0,1\%$, espera-se que no mínimo uma vez por ano ocorra um dano colateral. Já com $CDE = 0,01\%$, é esperado que passem vários anos sem grandes reveses.

V. CONCLUSÃO

A metodologia proposta apresenta clara vantagem em relação ao método de simulação Monte Carlo, pois combina precisão na modelagem geométrica do $CDRO$ e das Áreas de

Exclusão de Pontaria de Efeito Colateral com eficiência computacional — obtendo resultados em milissegundos. Essa agilidade permite ao planejador militar testar múltiplos cenários de emprego de armamentos em tempo quase real, sem sacrificar a acurácia necessária para o teste de proporcionalidade.

A relevância deste modelo se dá pela sua capacidade de padronizar o processo de $CDEM$ em todos os níveis de planejamento, assegurando consistência metodológica nas operações. Ao fornecer intervalos temporais confiáveis para a ocorrência de danos colaterais e facilitar a escolha de um risco de exposição aceitável, o método apoia o cumprimento das obrigações do DICA e reduz a subjetividade na tomada de decisão.

Entre suas possíveis aplicações militares destacam-se:

Planejamento de missões de ataque: definição precisa de zonas de exclusão para minimização de danos a civis e infraestruturas críticas;

Otimização de perfis de emprego de armas: ajustando parâmetros como espoletagem e direção de ataque para maximizar a eficácia e mitigar riscos; e

Integração a sistemas de pontaria: permitindo rápida estimativa de dano colateral antes do lançamento de um armamento com base em dados probabilísticos.

Em suma, o uso de elementos finitos para $CDEM$ constitui um avanço significativo na integração entre modelagem numérica e requisitos legais, conferindo aos tomadores de decisão militar um instrumento robusto, ágil e juridicamente embasado para a condução responsável de operações.

REFERÊNCIAS

- [1] European External Action Service (EEAS). Avoiding and Minimizing Collateral Damage in EU-led Military Operations Concept. [S.l.]. 2016.
- [2] International Committee Of The Red Cross. The Geneva Conventions and their Commentaries. Geneva Conventions and the law. Disponível em: <<https://www.icrc.org/en/law-and-policy/geneva-conventions-and-their-commentaries>>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- [3] J. M. Knapp S. Probabilidade de impacto de tiro único em alvo poligonal. XVI SIGE, São José dos Campos, 2024.
- [4] M. R. Driels. Weaponneering Conventional Weapon System Effectiveness. 2ª. ed. Virginia: AIAA Education Series, 2013.
- [5] M. W. Scroggs, P. D. Brubeck, J. P. Dean, J. S. Dokken, I. Marsden, N. Nobre, et al. The finite element method. DefElement: an encyclopedia of finite element definitions, 2025. Disponível em: <<https://defelement.org/>>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- [6] G. F. Kinney; K. J. Graham. Explosive Shocks in Air. Springer. New York. 1985.
- [7] Military Analysis Network. Introduction to Naval Weapons Engineering. [S.l.]: [s.n.], 1998. Disponível em: <https://man.fas.org/dod-101/navy/docs/es310/dam_crit/dam_crit.htm>.
- [8] J. M. Knapp S.. Modelo de estimativa de força para sistemas de armas ar-superfície contra alvos bidimensionais. Curso de Especialização em Análise e Seleção de Sistemas de Armas, São José dos Campos, SP, p. 146, 2022.
- [9] P.C.F. Miscow e F. B. Mendonça Notas de aula da disciplina Análise e Seleção de Sistemas de Armas: Aula de Seleção de Armamento. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2022.