

EFEITO DA DENSIDADE DE MALHA NA ENERGIA DE HOURGLASS EM SIMULAÇÃO MULTI-IMPACTO

Pedro Gabriel Oliveira da Silva dos Santos, 160038189@aluno.unb.br¹

Klyssmann Henrique Ferreira de Oliveira, 202028202@aluno.unb.br¹

Rita de Cássia Silva, ritasilva@unb.br¹

Alessandro Borges de Sousa Oliveira, abso@unb.br¹

¹ Universidade de Brasília - Faculdade do Gama, 72.444-240

Resumo: Dado o uso crescente da blindagem veicular no Brasil, faz-se necessário desenvolver modelos numéricos confiáveis que consigam reproduzir o fenômeno de impacto. A investigação dessa proteção em operação se justifica de-vido às graves consequências que uma falha pode causar. No território brasileiro, a blindagem veicular é normatizada pelas NBR 15000 e NEB E-316. A primeira afirma que, no maior nível de proteção permitido aos civis, a blindagem deve resistir a cinco impactos. Dessa forma, utilizando o método dos elementos finitos, o presente trabalho procura examinar numericamente o efeito da mudança na densidade de malha na energia de hourglass ao simular o multi-impacto de projéteis em uma placa metálica retangular. A energia de hourglass é uma espécie de energia adicionada aos cálculos numéricos para evitar que os elementos se deformem de maneira incompatível com o fenômeno real. A presença dessa categoria de energia no sistema pode ser usada como parâmetro para avaliar a qualidade do estudo numérico. O material selecionado para os projéteis foi o latão e para a placa o aço 304L, mais utilizados para este fim. Neste estudo, os projéteis foram caracterizados como corpos rígidos. Quanto à placa, foram simuladas cinco densidades de malha diferentes, variando o tamanho dos elementos entre 5 mm e 0,4 mm. A velocidade inicial de cada projétil foi de 426 m/s e a placa foi engasta em suas quatro faces laterais. As análises numéricas utilizam a metodologia de integração explícita e realizadas no software Ansys – Explicit Dynamics, versão 18.1. Como resultado, a velocidade residual de cada um dos projéteis, o deslocamento máximo da placa e o histórico da energia cinética, interna e da ampulheta do sistema em função do número de ciclos de simulação foram obtidos. Ao final das cinco simulações, a razão entre a energia de hourglass e a energia interna foi reduzida de 97,05% para 17,76%.

Palavras-chave: densidade de malha, energia de hourglass, impacto balístico, proteção balística

1. INTRODUÇÃO

A blindagem é uma tecnologia desenvolvida para impedir, ou pelo menos aumentar, a proteção de pessoas e objetos contra armas de fogo. Inicialmente desenvolvida para os militares, hoje o mercado mundial de veículos blindados apresenta constante crescimento. Markets and Markets (2020) estimou para o ano de 2020 um volume de negócios de 11,6 bilhões de dólares, atingindo US\$15,4 bilhões no ano de 2025.

Neste cenário, o Brasil é o líder mundial na contratação do serviço de blindagem em carros de passeio (do Transporte, 2020). Segundo a Abrablin (Associação Brasileira de Blindagem), somente no primeiro semestre de 2020, mais de 7875 novos veículos já estavam com a proteção. No total, a frota já ultrapassa a marca de 220 mil unidades (Investe, 2019). A demanda por veículos com esta proteção já é tão comum que as próprias marcas começaram a oferecer veículos com a opção blindada de fábrica, como informa Bloomberg (2020).

Com esta popularização, faz-se necessário atestar a eficácia da proteção empregada, pois uma falha na blindagem coloca o usuário em risco de morte. Nesse sentido, no Brasil, a proteção oferecida pela blindagem aplicada em veículos é normatizada pela Norma Brasileira 15000 (ABNT, 2005) e pela Norma do Exército Brasileiro E-316 (E. Brasileiro, 2003). Ambos os documentos seguem os princípios da norma NIJ 0108.01 do Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ, 1985).

Tanto (ABNT, 2005), quanto (E. Brasileiro, 2003) e (NIJ, 1985), classificam o nível de proteção da blindagem conforme a espécie da munição, velocidade inicial do disparo e o número de impactos. No total há seis níveis de proteção, no entanto, a Portaria 55 (da Defesa, 2017) permite o acesso de civis somente até o quarto nível, denominado III-A. Acima deste nível, é necessária uma autorização especial do Exército Brasileiro. Como a diferença entre o custo de realizar uma blindagem de menor proteção (nível I) e o custo da blindagem nível III-A é pequena, os consumidores optam pela categoria de proteção superior. As blindagens que pertencem ao nível III-A, segundo a NBR 15000 (ABNT,

2005) devem resistir a cinco impactos do projétil .44 Magnum Semi WadCutter Gas Check (SWC GC), à velocidade de 426 metros por segundo, o que em termos de energia é aproximadamente 7077 J.

Como dito anteriormente, para a segurança do usuário, é importante assegurar a eficácia dessa proteção. Normalmente, a segurança da blindagem é verificada por ensaios de laboratório, seguindo as disposições da (ABNT, 2005), onde o corpo de prova é submetido aos cinco impactos. Entretanto, devido à natureza do fenômeno de impacto, o nível de energia envolvido, os requisitos de segurança necessários para o ensaio e o custo das peças testadas tornam o exame em laboratório muito dispendioso. Todavia, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), é possível realizar simulações numéricas bastante aproximadas, obtendo resultados similares aos observados nos testes experimentais, porém com um custo financeiro menor. Este método também permite analisar vários fenômenos estruturais, incluindo eventos dinâmicos com não linearidades, tais como mudanças na geometria e propriedades físicas do material ao longo do evento (Filho, 2012).

Diante do custo dos testes experimentais, diversos pesquisadores utilizam o MEF para analisar o impacto entre um projétil e uma placa. Exemplo disso é o estudo de Sadiq *et al.* (2014), onde o MEF foi utilizado para verificar a resistência ao impacto de placas metálicas reforçadas com concreto e painéis de lajes de concreto armado. Neste estudo, também foram realizados testes com modelos em escala e os resultados obtidos nas duas metodologias tiveram boa correspondência. Já o estudo de Narayanamurthy *et al.* (2014) utiliza o MEF para examinar numericamente o impacto balístico em uma placa metálica e seus resultados também foram similares aos resultados obtidos experimentalmente.

Assim como nestas pesquisas, Kurtaran *et al.* (2003), Soydan *et al.* (2018), Santos *et al.* (2019) e grande parte da literatura trata apenas da colisão entre um projétil e uma placa. No entanto, em situações reais de disparos com arma de fogo, é raramente feito somente um disparo, por isso, o presente trabalho considera o impacto de cinco projéteis contra uma placa metálica, como proposto na NBR 15000 (ABNT, 2005).

Antes do impacto, toda a energia do sistema está concentrada no projétil, na forma de energia de movimento, ou seja, energia cinética (E_c), calculada de acordo com a Eq. (1), onde m é a massa do projétil e v sua velocidade (Filho, 2012).

$$E_c = \frac{mv^2}{2}. \quad (1)$$

Durante o evento, conforme o projétil penetra no alvo, a energia cinética do corpo em movimento é convertida em energia térmica (E_T) e em energia interna de deformação (U_o) no corpo que recebe a colisão. Esse por sua vez, sofre deformação permanente e pode até ser perfurado. Este princípio é utilizado no presente estudo e serviu como base para Narayanamurthy *et al.* (2014) examinar numericamente o impacto balístico na porta de um veículo militar.

A energia de deformação pode ser contabilizada na placa metálica e no próprio projétil a partir do cálculo das deformações sofridas por esses corpos. Se o projétil exibir movimento após o impacto, é dito que ele tem velocidade residual (v_r). Esta velocidade é usada na Eq. (1) para calcular a energia cinética após o impacto.

Assim, o balanço energético do sistema entre os instantes antes e depois do impacto obedece à relação descrita pela Eq. (2). Os índices 1 e 2 denotam antes e depois do impacto, respectivamente.

$$E_{c1} - E_T - U_o - E_{c2} = 0. \quad (2)$$

A Equação (2) é o princípio físico da conservação de energia, fundamental para o estudo de sistemas dinâmicos. Entretanto, ao utilizar o método dos elementos finitos, mais um fator deve ser adicionado a essa equação: a energia de *hourglass* (E_H). Essa categoria de energia é adicionada aos cálculos numéricos para evitar que os elementos se deformem de maneira incompatível com a realidade, aliviando o chamado efeito ampulheta.

Este efeito consiste na distorção do elemento de tal maneira que, numericamente, não é possível contabilizar sua deformação. Um exemplo deste efeito é mostrado na Fig. 1, onde embora o elemento tenha se deformado, suas diagonais permanecem com o mesmo comprimento. Outro exemplo é mostrado na Fig. 2, retirado de Ansys (2017), que exibe uma malha antes e após sofrer o efeito ampulheta. Quanto mais esta energia é adicionada ao sistema, menos verossímeis costumam ser os resultados provenientes da simulação.

Tradicionalmente, Day (2017) recomenda que o valor da energia de *hourglass* seja inferior a 10% da energia interna. Entretanto, como mostrado por Zaouk *et al.*, quanto mais severo for o impacto, maior será a porcentagem da energia de *hourglass* em relação à energia interna.

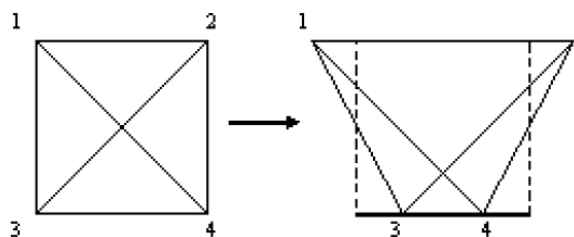


Figura 1: Exemplo do efeito ampulheta em um elemento 2D (Ansys, 2017).

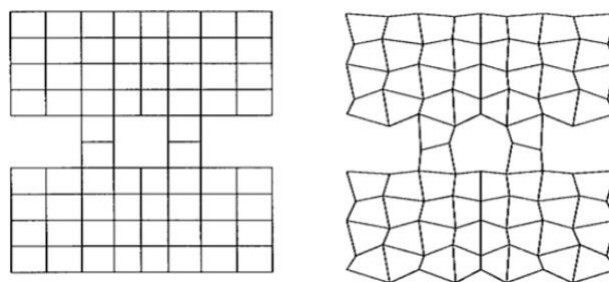


Figura 2: **Malha antes e depois do efeito ampulheta (Day, 2017).**

Dada sua importância, manter a energia de *hourglass* no limite aceitável é uma tarefa trabalhosa para os pesquisadores. Em uma análise multi-impacto, este cuidado se torna ainda mais relevante e árduo, já que a energia de *hourglass* aumenta a cada impacto. Portanto, nestes casos, é de grande importância controlar o acréscimo dessa energia desde o início da análise, para assegurar que, ao fim da simulação, a razão entre a energia de *hourglass* e a energia interna não exceda 10%.

A solução mais direta para o problema do excesso de energia de *hourglass* é refinar a malha do corpo que sofre o efeito ampulheta (Day, 2017). No caso de uma simulação de impacto balístico, o corpo que mais sofre esse efeito é o alvo.

Em consequência do crescimento da utilização da blindagem automotiva, da relevância e do custo de seus testes, da escassez de estudos que simulam casos de multi-impacto e a importância de obter simulações confiáveis para este fenômeno, o presente trabalho visa a analisar o efeito da densidade de malha da placa na evolução da energia de *hourglass*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Método Numérico e Tempo de Processamento

O impacto entre dois corpos é um evento dinâmico, portanto, obedece à equação de equilíbrio dinâmico, Eq. (3), que contabiliza os efeitos das forças de inércia, elásticas e de amortecimento. Nesta equação, u , $\dot{u}$ e $\ddot{u}$ são o deslocamento, a velocidade e a aceleração dos pontos nodais, respectivamente (Filho, 2012) (Hughes, 1987).

$$m\ddot{u} - c\dot{u} - ku = 0. \quad (3)$$

Na Equação (3), as forças de inércia são determinadas pela parcela que considera a massa m do sistema. As forças de amortecimento são estabelecidas na parcela que contém o coeficiente de amortecimento c . Quanto às forças elásticas, elas são calculadas na parcela que considera a rigidez k da estrutura. Por fim, F é a força resultante do sistema (Filho, 2012) (Hughes, 1987).

Em um impacto balístico, são esperadas grandes deformações, plasticidade e falha do material. Quando estas não linearidades ocorrem, a literatura (Filho, 2012) (Hughes, 1987) recomenda o uso do método de integração explícita. Em concordância com Ansys (2017), o presente trabalho foi desenvolvido no *software Ansys - Explicit Dynamics*, que utiliza o método de integração explícita para solucionar o modelo numérico.

No método explícito, o equilíbrio da Eq. (3) é buscado apenas em alguns instantes discretos no intervalo de tempo em que o impacto ocorre. Tais instantes são separados por um intervalo de tempo Δt e, por meio do método das diferenças centrais, é possível escrever $u_{t+\Delta t}$ em função de $u_{t-\Delta t}$ e u_t . Assim, a estabilidade do método depende do tamanho do intervalo de tempo. Para que o sistema seja matematicamente estável, este intervalo deve possuir um valor mínimo, calculado conforme a Eq. (4), onde $\omega_{\max}$ é a maior frequência natural crítica do menor elemento. Embora este método resulte em um certo erro numérico, ele requer um esforço computacional menor em relação a outros métodos.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}}. \quad (4)$$

Em uma simulação numérica de impacto, os momentos que antecedem o evento são irrelevantes para o resultado da análise, pois não há qualquer dissipação de energia antes da colisão. Entretanto, este período de pré-impacto consome um elevado tempo de processamento. Para diminuir este custo computacional, e otimizar o tempo de processamento, o primeiro projétil está separado por 0,7 mm da face de impacto da placa. O segundo projétil está a 500 mm do segundo, o terceiro está a 500 mm do segundo, e assim por diante até o quinto projétil. Esta distância implica que um disparo atinge a placa a cada 1,17 milissegundos, já que a velocidade de disparo, conforme determinado pela norma NBR 15000 (ABNT, 2005), é de 426 m/s. Portanto, os cinco impactos ocorrem em um período de 4,68 milissegundos.

Este curto tempo em que uma elevada quantidade de energia cinética é transformada em energia de deformação é a principal característica do fenômeno de impacto balístico. Determinar o tempo total entre o primeiro e o último impacto é importante, pois essa informação é uma entrada para a análise numérica. Caso seja colocado um valor elevado, a simulação levará muito para ser concluída. Por outro lado, um valor inferior ao necessário fará com que o *software* interrompa a simulação antes que o evento seja concluído. Para evitar estes dois problemas, o tempo de simulação adotado foi de 5,5 milissegundos, mesma ordem de grandeza usada em Narayanamurthy *et al.* (2014) e em Kurtaran *et al.* (2003).

2.2. Materiais

Visando uma abordagem mais próxima da realidade, os materiais do presente estudo foram escolhidos conforme a sua utilização no mercado brasileiro de blindagem automotiva.

Na blindagem veicular, são utilizadas placas metálicas nas colunas dianteiras, centrais e traseiras, além das fechaduras, retrovisores e cinta metálica das rodas, como mostrado na Fig. 3. Em geral, o metal mais utilizado para a proteção nível III-A é o aço inoxidável 304L, com uma espessura de 3 mm, portanto, este material será o adotado para placa que receberá os disparos (Bloomberg, 2020).



Figura 3: Locais de aplicação da blindagem em aço (Blindagens, 2019).

A modelagem de material adotada para o aço 304L é o modelo Johnson-Cook (JC). Esta modelagem, por ser proveniente de testes empíricos, permite prever com mais eficácia o comportamento mecânico do material (Zhang *et al.*, 2015) (Sahim, 2015). Além disso, a escolha deste modelo ocorre porque ele inclui os efeitos da deformação plástica, efeitos térmicos e possui sensibilidade à alta taxa de deformação, características importantes do impacto balístico (Kurtaran *et al.*, 2003) (Sahim, 2015).

A tensão equivalente para o modelo de JC é calculada segundo a Eq. (5), onde σ é a tensão equivalente, ϵ é a deformação plástica equivalente, ϵ_0 é a taxa de deformação de referência, T_R é a temperatura ambiente e T_M é a temperatura de fusão do material. A , B , n , C e m são parâmetros que caracterizam o material (Sahim, 2015). Para o aço 304L, os valores utilizados estão listados na Tab. 1, obtidas de testes experimentais de impacto realizados por Gomuc (2004). Outras propriedades relevantes para a modelagem deste material no *software* de análise estão listadas na Tab. 2.

$$(A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^m \right]. \quad (5)$$

Tabela 1. Constantes da equação de Johnson-Cook para o aço 304L (Gomuc, 2004).

A (MPa)	344,74
B (MPa)	310,26
n	0,3
C	0,24
m	1,03
T_M (K)	1673,15
$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)	10 ⁻⁵

Em relação ao projétil, o material utilizado em sua fabricação é o latão, uma liga de cobre e zinco. As características de modelagem deste material, foram retiradas da biblioteca de materiais do próprio software, assim como feito por Soydan *et al.* (2018).

Tabela 2: **Propriedades físicas do aço 304L (Gomuc, 2004).**

Densidade (kg/m^3)	7830
Módulo de Elasticidade (GPa)	193
Coefficiente de Poisson	0,305
Calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	500

2.3. Dimensões e condições iniciais

As geometrias da placa e do projétil, foram confeccionadas conforme as especificações da NBR 15000 (ABNT, 2005) e da NEB E-316 (E. Brasileiro, 2003). A placa metálica tem face quadrada, com 500 mm de lado e receberá o impacto de cinco disparos, dispostos e ordenados como mostrado na Fig. 4. Como mencionado anteriormente, a espessura comercial da placa metálica é de 3 mm, portanto este é o valor utilizado neste estudo. O projétil utilizado, mostrado na Fig. 5, é o .44 Magnum SWC GC com diâmetro de 11,6 mm e massa igual a 0,0156 kg.

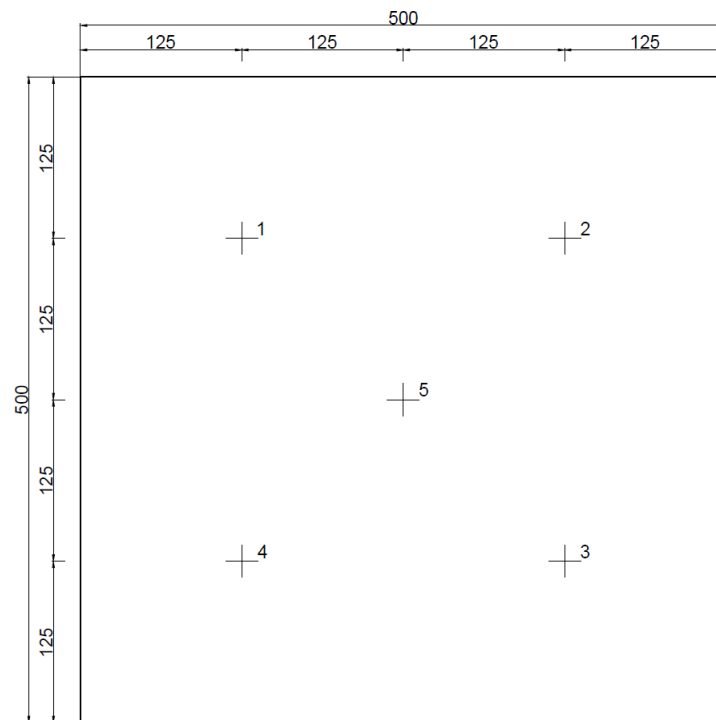


Figura 4: **Geometria da placa, disposição e ordem dos disparos (ABNT, 2005).**

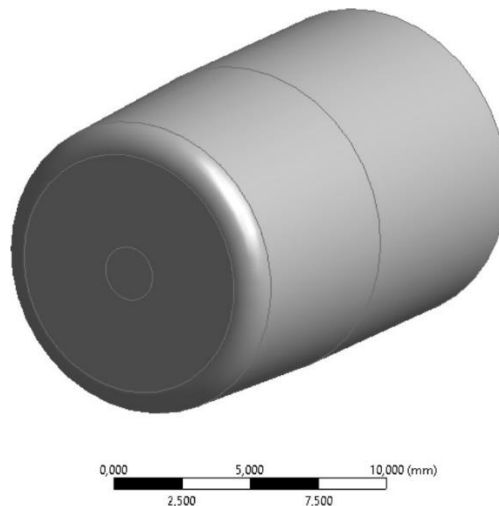


Figura 5: **Geometria do projétil .44 Magnum SWC GC.**

Ainda conforme as normas ABNT (2005) e E. Brasileiro (2003), as faces laterais da placa foram engastadas e o valor de 426 m/s foi atribuído como velocidade inicial a cada um dos projéteis. Outra condição implementada foi a de não deformação dos elementos da malha dos projéteis. Esta condição foi adotada não só porque em Santos *et al.* (2019) foi verificado que este corpo pouco se deforma, mas também porque esta escolha diminui o custo computacional da simulação, visto que o programa deixa de calcular os deslocamentos nodais dos elementos dos projéteis. Em outras palavras, manter os projéteis como corpos rígidos aumenta a eficiência da análise numérica.

2.4. Variação da densidade de malha e número de disparos

Para discretizar a placa metálica, foram utilizados elementos hexaédricos lineares. Este elemento é muito recorrente na literatura, como nos estudos de Narayanamurthy *et al.* (2014) e Raguramana *et al.* (2009), devido a sua simplicidade e eficácia, conseguindo representar com boa aproximação diversos tipos de fenômenos dinâmicos.

Para verificar a influência da densidade de malha na energia de *hourglass*, foram realizadas cinco simulações, alterando em cada uma delas o tamanho dos elementos da malha da placa, como mostra a Tab. 3. O controle do tamanho dos elementos foi realizado por meio da escolha do número de divisões das bordas da placa.

Tabela 3: Tamanho dos elementos e número de disparos.

Simulação	Nº de divisões		Tamanho dos elementos (TE) (mm)	Número de disparos
	Borda	Espessura		
1	100	1	5	5
2	500	3	1	5
3	667	4	0,75	5
4	1000	6	0,50	2
5	1250	7	0,40	2

A dimensão característica escolhida para o tamanho dos elementos (TE) foi o comprimento das arestas frontais e posteriores dos elementos que compõem a malha da placa. O comprimento das arestas laterais, na direção da espessura da placa, foi escolhido de modo a gerar camadas uniformes de elementos nesta direção e valor próximo à dimensão característica.

Outro aspecto importante é que foi utilizada uma malha estruturada, com elementos cúbicos pouco distorcidos, como mostrado na Fig. 6. Este aspecto foi alcançado dividindo-se as quatro bordas em igual número. Esta configuração evita grandes distorções nos elementos, aumentando a qualidade da análise numérica. Devido ao aumento considerável do número de elementos nas simulações 4 e 5, optou-se por diminuir o número de impactos de 5 para 2. Conforme será discutido na seção 3, esta escolha é razoável devido ao custo computacional e à característica dos resultados obtidos.

Ao final de cada simulação, é obtido um gráfico da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do tempo. Também são obtidos os valores máximos de deslocamento da placa após o fim dos disparos.

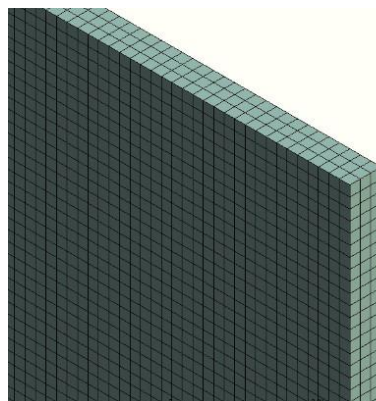


Figura 6: Malha da placa para o tamanho de elemento de 1 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em cada simulação foram obtidos os valores de velocidade residual de cada projétil, a evolução dos valores de cada categoria de energia do sistema ao longo dos impactos também foi monitorada e, por fim, o deslocamento máximo da placa. Para permitir uma melhor visualização, os valores da velocidade residual dos projéteis obtidos em cada simulação são apresentados em forma de gráfico na Fig. 7.

As figuras de 7 a 12 mostram os gráficos da magnitude da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do número de ciclos da simulação, para os tamanhos de elementos de 5, 1, 0,75, 0,5 e 0,4 milímetros, respectivamente.

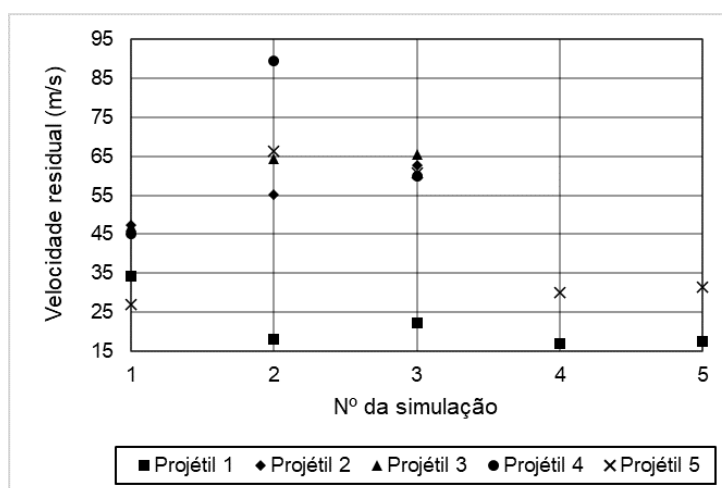


Figura 7: Velocidade residual dos projéteis em cada simulação.

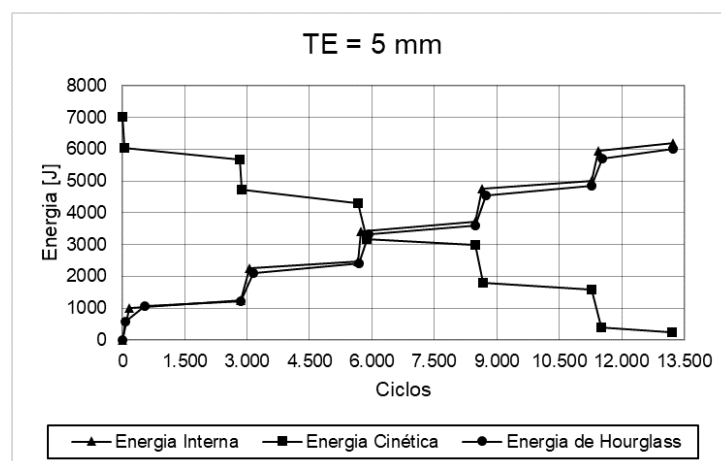


Figura 8: Gráfico da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do número de ciclos para o tamanho de elemento de 5 mm.

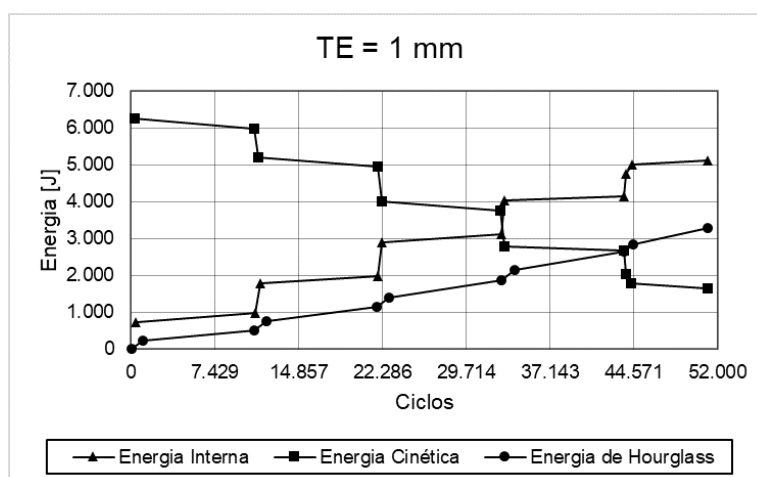


Figura 9: Gráfico da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do número de ciclos para o tamanho de elemento de 1 mm.

Consoante com os valores mostrados na Fig. 7, bem como em todos os gráficos de energia mostrados nas figuras de 8 a 12, a evolução da energia cinética e da energia interna certifica que houve transferência de energia dos projéteis para a placa. Também é possível verificar que o aumento do refinamento da malha implicou no aumento da energia cinética do sistema. Entretanto, observa-se o oposto para a energia interna de deformação.

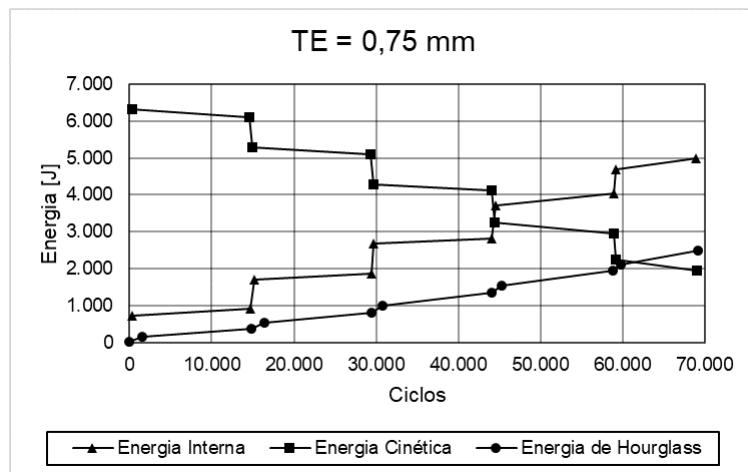


Figura 10: Gráfico da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do número de ciclos para o tamanho de elemento de 0,75 mm.

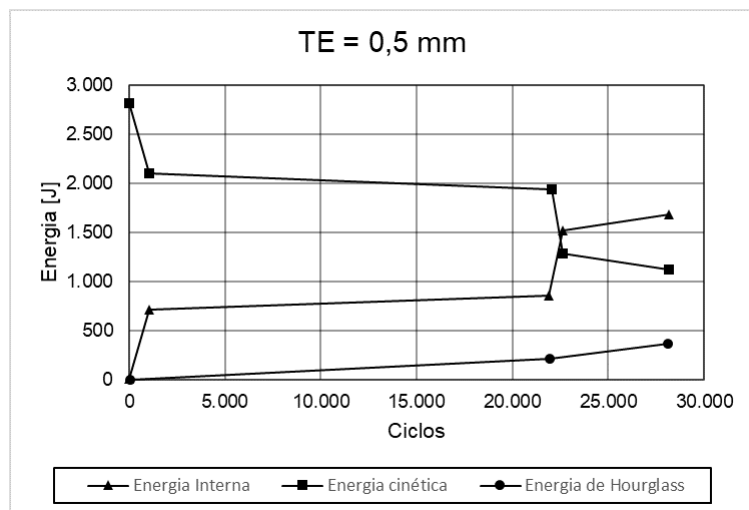


Figura 11: Gráfico da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do número de ciclos para o tamanho de elemento de 0,50 mm.

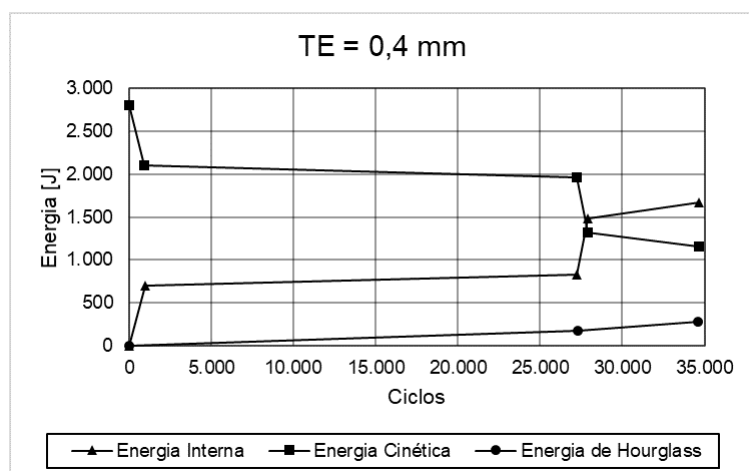


Figura 12: Gráfico da energia cinética, interna e de *hourglass* em função do número de ciclos para o tamanho de elemento de 0,40 mm.

Como esperado, a taxa da energia de *hourglass* em relação à energia interna diminuiu a cada aumento na densidade de malha da placa. Além disso, a energia de *hourglass* passou a exibir um comportamento cada vez mais linear à medida que o tamanho dos elementos da malha diminuía, apresentando um incremento menor a cada simulação. Os valores do deslocamento máximo da placa obtidos em cada análise numérica são mostrados na Tab. 4. Pode-se observar

que a diminuição do tamanho do elemento, levou a uma variação menor do deslocamento máximo obtido, com os três últimos resultados tendo o valor de aproximadamente 7 mm.

Um ponto a ser destacado é o custo computacional, que se elevou consideravelmente a cada aumento na densidade de malha, como mostrado na Tab. 5 e o aumento do número de ciclos totais nas figuras de 8 a 10. Este aumento no tempo de processamento das análises inviabilizou o estudo com 5 disparos para as simulações com elementos inferiores a 0,75 milímetros. Por isso, foi decidido reduzir o número de impactos na placa para 2. Entretanto, o comportamento característico e repetitivo das energias cinética, interna e de *hourglass* permitiu a construção completa dos gráficos de energia a partir das figuras 11 e 12. O resultado desta construção é mostrado nas figuras 13 e 14.

Tabela 4: **Deslocamento máximo da placa em cada simulação.**

Simulação	1	2	3	4	5
Tamanho do elemento - TE (mm)	5	1	0,75	0,50	0,40
Deslocamento máximo (mm)	8,20	6,91	7,47	7,16	7,21

Tabela 5: **Custo computacional de cada simulação.**

Simulação	1	2	3	4	5
Custo computacional (horas)	0,12	47,80	56,67	70,32	159,60

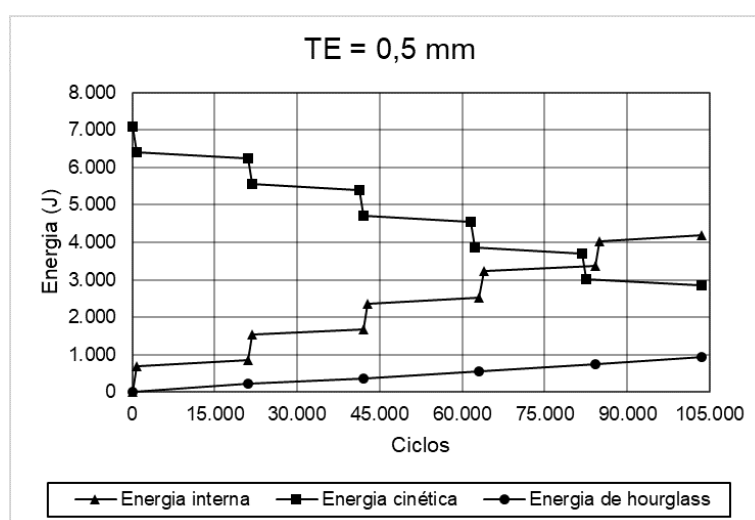


Figura 13: Gráfico de energia construído a partir dos resultados obtidos para o tamanho de elemento de 0,50 mm.

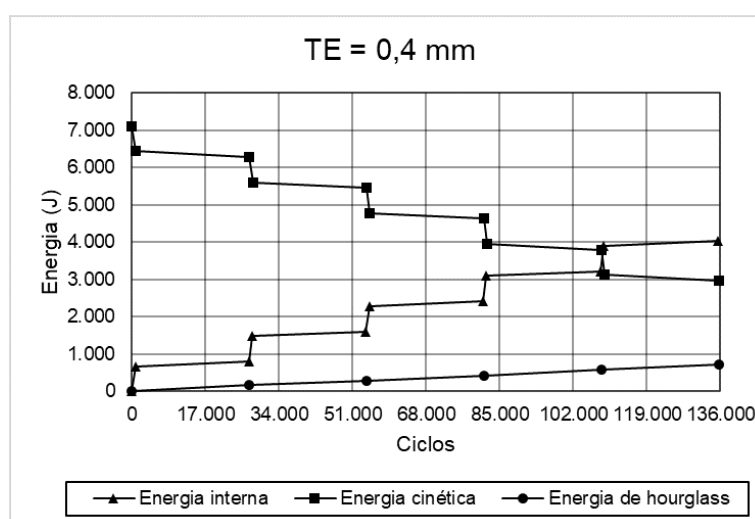


Figura 14: Gráfico de energia construído a partir dos resultados obtidos para o tamanho de elemento de 0,40 mm.

Obtidos os cinco gráficos de energia completos, calculou-se a porcentagem de energia de *hourglass* em relação à energia interna. Os valores desta razão são mostrados na Tab. 6.

Tabela 6: Porcentagem de energia de *hourglass* em relação à energia interna.

Simulação	1	2	3	4	5
Energia de <i>hourglass</i> (J)	6000	3280	2483	923	714
Energia interna (J)	6182	5121	4976	4194	4023
Razão entre a energia de <i>hourglass</i> e interna (%)	97,05	64,05	49,91	22,01	17,76

Analisando os valores da velocidade residual dos projéteis da Fig. 7 e os gráficos de energia em função do número de ciclos nas figuras de 8 a 10, verifica-se que a maior parte da energia cinética inicial de cada um dos projéteis foi transferida para a placa na forma de energia de deformação. Toda essa transformação ocorreu em apenas 5,5 milissegundos, que foi o tempo escolhido para a simulação.

Os valores obtidos de velocidade residual (Fig. 7) não apresentaram qualquer tipo de comportamento previsível. Logo, esse resultado mostrou-se extremamente sensível à densidade de malha da placa. Por esse motivo não foi possível prever esses valores nas simulações 4 e 5, onde somente dois disparos foram efetuados.

Por outro lado, o deslocamento máximo da placa (Tab. 4) apresentou menor dependência da densidade de malha da placa, já que este valor se modificou menos de 1 mm nas últimas três simulações, obtendo-se, portanto, uma boa convergência neste parâmetro. Ao comparar este resultado com o nível de energia de *hourglass* inserido no sistema, presente nas figuras de 8 a 12, constata-se a contribuição negativa desta espécie energia nas análises numéricas, reforçando a necessidade de controlá-la.

Como deslocamentos semelhantes foram obtidos nas três últimas simulações, embora as duas últimas tenham sofrido apenas dois impactos, sugere que a distância entre os impactos é tal que um não interfere no outro. Em outras palavras, há indícios de que um disparo não penalize a placa o suficiente para alterar o comportamento deste material ao receber outro impacto em um local mais afastado.

Ao se comparar os gráficos das figuras 8, 9, 10, 13 e 14, percebe-se a diminuição da diferença entre os valores finais da energia cinética final e da energia interna. Entretanto, esta diminuição não corresponde aos valores de velocidade residual obtidos para os projéteis. Todavia, como o software calcula a energia cinética para todo o sistema, deduz-se que esse excesso de energia provém dos nós da placa, deslocados pelo impacto. Isto ocorre, porque o refinamento da malha da placa aumenta o número de graus de liberdade deste corpo, permitindo o deslocamento de mais nós, que passam também a contabilizar na energia cinética final do sistema (Filho, 2012) (Santos *et al.*, 2019). Por outro lado, isto reduz as deformações por efeito ampulheta, indicadas pela diminuição da energia de *hourglass* no sistema.

Não apenas o aumento da densidade da malha da placa praticamente eliminou as descontinuidades no gráfico da energia de *hourglass*, aproximando-se de um comportamento linear, mas também a inclinação da curva diminuiu, sugerindo que, no caso de um elemento suficientemente pequeno, essa energia se tornaria independente da densidade da malha da placa.

Conforme mostra a Tab. 6 a menor taxa de energia de *hourglass* obtida neste estudo foi de 17,76%, valor acima do recomendado em Day (2017) e na maioria da literatura. Entretanto, como mostrado por Zaouk *et al.*, quanto mais severo o impacto, mais árduo é reduzir a porcentagem da energia de *hourglass*, devido às grandes deformações que os elementos sofrem.

Também no estudo de Zaouk *et al.*, testes experimentais e análises numéricas foram utilizadas utilizando o MEF, e embora a energia de *hourglass* da simulação tenha atingido um nível de 17%, houve boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais. Este êxito, quando comparado com o resultado de deslocamento máximo obtido no presente trabalho, indica que para análises numéricas com impacto severo, o nível de energia de *hourglass* ligeiramente acima dos 10%, ainda pode conduzir a bons resultados.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se com o desenvolvimento do trabalho que: 1) A energia de *hourglass* diminuiu aumentando a densidade de malha; 2) Houve um grande aumento no tempo de processamento da simulação; 3) A velocidade residual dos projéteis mostrou ser muito sensível à densidade de malha; 4) O deslocamento máximo da placa mostrou ser menos sensível à densidade de malha do que a velocidade residual dos projéteis.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha orientadora, Prof^a. Dr.^a Rita de Cássia, por sua confiança em meu trabalho acadêmico, pelas muitas horas de aprendizado que me foram proporcionadas e, sobretudo, por me aconselhar sobre os melhores caminhos a serem trilhados, sempre me estimulando a avançar. Agradeço também à Universidade de Brasília por tornar possível a realização desta pesquisa científica.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT, 2005. *NBR 15000: Blindagens para impactos balísticos - Classificação e critérios de avaliação*. Rio de Janeiro.
- Ansys, I., 2017. *ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide 18.1*.
- Blindagens, L., 2019. “Blindagens especiais”. url: <https://www.lockerblindagens.com.br>.
- Bloomberg, 2020. “Do brasil aos eua, demanda por veículos blindados está em alta”. url: <https://economia.uol.com.br>.
- da Defesa, M., 2017. *Portaria Nº 55 - COLOG*. Distrito Federal.
- Day, J., 2017. *LSTC Presentation*.
- do Transporte, C.N., 2020. “Brasil tem mais de 200 mil veículos blindados”. url: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/blindagem-contra-violencia-frota-veiculos-blindados-brasil-200-mil>.
- E.Brasileiro, 2003. *NEB E-316: Proteção balística de carros de passeio*. Distrito Federal.
- Filho, A.A., 2012. *A Base da Tecnologia CAE – Análise Não Linear*. Érica, São Paulo, Brasil.
- Gomuc, R., 2004. “Explicit finite element modeling of multilayer composite fabric for gas turbine engine containment systems, phase ii - update to part 3: Material model development and simulation experimentst”. Technical Report DOT/FAA/AR-04/40, P4, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Hughes, T.J.R., 1987. *The Finite Element Method – Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications, Nova Iorque, Estados Unidos.
- Investe, V., 2019. “Brasil tem a maior frota de blindados do mundo; no rio cresce 50%”. url: <https://valorinveste.globo.com>.
- Kurtaran, H., Buyuk, M. and Eskandarian, A., 2003. “Ballistic impact simulation of gt model vehicle door using finite element method”. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 40, pp. 113–121. doi:10.1016/S0167-8442(03)00039-9.
- Markets and Markets, 2020. “Armored vehicles market”. url: <https://www.marketsandmarkets.com>.
- Narayanamurthy, V., Rao, C.L. and Rao, B.N., 2014. “Numerical simulation of ballistic impact on armour plate with a simple plasticity model”. *Defense Science Journal*, Vol. 64, No. 1, pp. 55–61. doi:10.14429/dsj.64.4521.
- NIJ, 1985. *NIJ Standard 0108.01: Ballistic resistant protective materials*. Washington.
- Raguramana, M., Debb, A. and Gupta, N., 2009. “Cae-based prediction of projectile residual velocity for impact on single multi-layered metallic armour plates”. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 6, pp. 247–263.
- Sadiq, M., Xiu, Z. and Rong, P., 2014. “Simulation analysis of impact tests of steel plate reinforced concrete and reinforced concrete slabs against aircraft impact and its validation with experimental results”. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 273, pp. 653–667.
- Sahim, S., 2015. *Static and Dynamic Deformation Behavior of Combined Geometry AISI 304L Stainless Steel Shells*. Master’s thesis, Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Izmir.
- Santos, P.G., Arão, M.R., Oliveira, K.F., de Cássia Silva, R. and de Sousa Oliveira, A.B., 2019. “Análise numérica da proteção balística fornecida pelo aço 304l”. In *Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Brasília e do Distrito Federal*. Distrito Federal, Brasil.
- Soydan, A.M., Tunaboğlu, B., Elsabagh, A.G., Sar, A.K. and Akdeniz, R., 2018. “Simulation and experimental tests of ballistic impact on composite laminate armor”. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018. doi: 10.1155/2018/4696143.
- Zaouk, A.K., Bedewi, N.E., Kan, C.D. and Marzougui, D., “Development and evaluation of a c-1500 pick-up truck model for a roadside hardware impact simulation”. *FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center*.
- Zhang, D.N., Shangguan, Q.Q., Xie, C.J. and Liu, F., 2015. “A modified johnson-cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-t6 aluminum alloy”. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 619, pp. 186–194. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.09.002.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT OF MESH DENSITY ON HOURGLASS ENERGY IN MULTI-IMPACT SIMULATIONS

Pedro Gabriel Oliveira da Silva dos Santos, 160038189@aluno.unb.br¹

Klyssmann Henrique Ferreira de Oliveira, 202028202@aluno.unb.br¹

Rita de Cássia Silva, ritasilva@unb.br¹

Alessandro Borges de Sousa Oliveira, abso@unb.br¹

¹ Universidade de Brasília - Faculdade do Gama, 72.444-240

Abstract. *Given the increasing use of vehicular armor in Brazil, it is necessary to develop reliable numerical models that can reproduce the impact phenomenon. The investigation of this protection in operation is justified due to the serious consequences that a failure can cause. In Brazil, vehicular armoring is regulated by NBR 15000 and NEB E-316. The former states that, at the highest level of protection allowed to civilians, the armoring must resist five impacts. Thus, using the finite element method, the present work seeks to numerically examine the effect of the change in mesh density on hourglass energy when simulating the multi-impact of projectiles on a rectangular metal plate. The hourglass energy is a kind of energy added to the numerical calculations to prevent the elements from deforming in a way that is incompatible with the real phenomenon. The presence of this energy category in the system can be used as a parameter to evaluate the quality of the numerical study. The material selected for the projectiles was brass and for the plate 304L steel, most used for this purpose. In this study, the projectiles were characterized as rigid bodies. As for the plate, five different mesh densities were simulated, varying the size of the elements between 5 mm and 0.4 mm. The initial velocity of each projectile was 426 m/s and the plate was crimped on its four side faces. The numerical analyses used the explicit integration methodology and performed in the software Ansys - Explicit Dynamics, version 18.1. As a result, the residual velocity of each of the projectiles, the maximum displacement of the plate, and the history of the kinetic, internal and hourglass energy of the system as a function of the number of simulation cycles were obtained. At the end of the five simulations, the ratio of hourglass energy to internal energy was reduced from 97.05% to 17.76%.*

Keywords: mesh density, hourglass energy, ballistic impact, ballistic protection