

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BLINDAGEM POLIONDULAR EM PROTEÇÃO BALÍSTICA *

Daniel Fonseca da Cunha¹
Achille Arantes Bassi²
Egydio Carvalho Souza Caria³
Fábio Lima da Silva⁴
Julio Cesar Soares de Oliveira⁵
Guilherme Pinto Guimarães⁶
Carlos Frederico de Matos Chagas⁷
Rodrigo Felix de Araujo Cardoso⁸
Luiz Paulo Mendonça Brandão⁹
Alaelson Vieira Gomes¹⁰

Resumo

Quando se utiliza materiais metálicos, aliar proteção balística e mobilidade é um grande desafio. Pensando em suprir essa necessidade, uma nova blindagem é proposta nesse trabalho, trata-se de uma blindagem metálica poliondular. Esse tipo de blindagem consiste em chapas metálicas com superfícies ondulares, que criam superfícies côncavas e convexas ao longo da chapa, podendo assim melhorar o desempenho em impactos balísticos. Para comprovar a eficácia deste modelo de blindagem foram realizadas análises computacionais com o software AUTODYN®, que utiliza o método de elementos finitos para solução de problemas que envolvam comportamento dinâmico de materiais. Os resultados das simulações mostram que para um mesmo volume de material, a blindagem poliondular é capaz de prover maior proteção às perfurações balísticas do que superfícies planas, com potencial para vir a ser uma alternativa viável para blindagem em viaturas de segurança pública.

Palavras-chave: Comportamento Dinâmico; Método de Elementos Finitos; Blindagem Balística; Simulação Computacional.

STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOR OF POLY WAVE ARMOR IN BALLISTIC PROTECTION

Abstract

When metal materials are used, combining ballistic protection and mobility is a major challenge. Thinking of supplying this need, a new shield is proposed in this work, it is a poliondular metallic shield. This type of shielding consists of metallic plates with corrugated surfaces, which create concave and convex surfaces along the plate, thus improving performance in ballistic impacts. To verify the effectiveness of this shielding model, computational analyzes were performed with AUTODYN® software, which uses the finite element method to solve problems involving dynamic behavior of materials. The results of the simulations show that for a given volume of material, the poliondular shield is able to provide greater protection to ballistic perforations than flat surfaces, with the potential to be a viable alternative for shielding in public safety vehicles.

Keywords:

Dynamic Behavior; Finite Element Method; Ballistic Armor; Computational Simulation.

¹ Engenharia Mecânica, Graduação em Engenharia Mecânica, Aluno de Mestrado, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- ² Engenharia Mecânica e de Armamento, Doutorado em Engenharia Mecânica, Professor, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ³ Engenharia Mecânica e de Armamento, Mestrado em Engenharia Mecânica, Professor, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁴ Engenharia Metalúrgica, Mestrado em Ciência dos Materiais, Aluno de Doutorado, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁵ Engenharia Metalúrgica, Mestrado em Ciência dos Materiais, Professor, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁶ Engenharia Mecânica e de Armamento, Doutorado em Ciência dos Materiais, Pesquisador, Divisão de Sistemas, Centro Tecnológico do Exército, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁷ Engenharia Mecânica e de Armamento, Doutorado em Ciência dos Materiais, Pesquisador, Divisão de Sistemas, Centro Tecnológico do Exército, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁸ Engenharia Mecânica, Doutorado em Ciência dos Materiais, Tecnologista, Seção de Tecnologia Mecânica, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁹ Engenharia Metalúrgica, Doutorado em Ciência dos Materiais, Professor, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ¹⁰ Engenharia Metalúrgica, Doutorado em Ciência dos Materiais, Professor, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Materiais metálicos vem sido amplamente utilizados em blindagens balísticas, contudo quando se utiliza este tipo de material, aliar proteção balística e mobilidade é um grande desafio. Desta forma, outros tipos de materiais para esta aplicação foram desenvolvidos ao redor do mundo, como é o caso de algumas cerâmicas e polímeros. Entretanto, polímeros de alto desempenho para blindagens tem alto custo, validade reduzida e são produzidos fora do Brasil. Quanto aos cerâmicos, são materiais frágeis com a característica de se fragmentar após o impacto, criando assim uma região desprotegida na blindagem.

A fim de se otimizar as blindagens metálicas existentes, este trabalho busca avaliar o comportamento de superfícies poliondulares quando submetidas a impactos balísticos.

Esta geometria permite a possibilidade de se usar chapas mais finas e consequentemente mais leves. Segundo Gomes [1], a variação da geometria da superfície de materiais cerâmicos apresenta melhores resultados para impactos balísticos quando comparados às placas planas. A superfície convexa também pode alterar a trajetória do projétil, evitando que incida perpendicularmente à superfície [2], contribuindo dessa forma para uma maior proteção balística.

Neste trabalho é avaliado o comportamento dinâmico de superfícies poliondulares de chapas metálicas de aço ABNT/AISI 4340 quando impactadas por um projétil 7.62X51FMJ (“Full Metal Jacket”), com uma sinergia entre geometria, dureza e tenacidade da blindagem metálica, representando uma alternativa importante para blindagem de viaturas da Segurança Pública e das Forças Armadas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

Na simulação em superfície plana foi utilizada uma placa que mede 100X100 mm e possui 3 mm de espessura. Nas simulações em superfícies convexas, foram utilizadas placas baseadas em uma função senoidal do tipo $F(X) = 15\sin(\pi X/50)$, com comprimento da placa equivalente a um período da função (100 mm) e espessura máxima de 3 mm. Tal geometria foi escolhida por possuir o mesmo volume de uma placa plana com largura e comprimento similares, possuindo em seu ponto de maior espessura, a mesma espessura da placa plana.

A fim de minimizar o tempo de processamento computacional, foi utilizada também uma placa com apenas meio período da função senoidal. O projétil (Figura 1) usado é o 7.62X51FMJ (“Full Metal Jacket”), com núcleo de chumbo e jaqueta de latão, com 9,78 g de massa, velocidade de 850 m/s e velocidade angular em torno do seu eixo de 17522 rad/s.

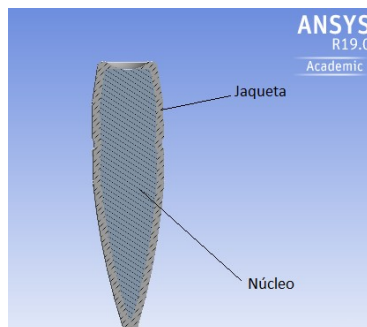


Figura 1. Projétil 7.62X51FMJ

Os projéteis atingiram a placa poliondular em posições equivalentes a 1/4, 1/2 e 3/4 do período da função que descreve a placa, e no caso da placa plana no centro da mesma. Em todas as análises foi desprezado o efeito de borda no resultado obtido. A avaliação das superfícies foi feita através de análises computacionais realizadas com o emprego do software AUTODYN®, um código computacional de elementos finitos com integração explícita da empresa ANSYS.

Os resultados utilizando-se placas planas e poliondulares foram comparados através da avaliação da Velocidade Residual do projétil na direção do disparo e da energia absorvida pela placa.

O método de elementos finitos é um método de análise de modelos matemáticos que consiste na discretização de uma estrutura em diversas subestruturas, denominados elementos finitos. O conjunto desses elementos compõe o que é conhecido como malha.

Para a utilização do método, há a necessidade da existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral sobre um domínio complexo por um somatório de integrais estendidas a subdomínios de geometria simples [3]. A integração realizada pode ser de modo explícito ou implícito.

O modo explícito é indicado em situações onde é possível aplicar uma matriz diagonalizada em que a matriz de tensões cisalhantes pode ser desprezada ou expressa em termos da matriz diagonalizada. Dessa forma, expressa-se $dt + \Delta t$ sem a necessidade de inversão de matrizes [4].

No caso estudado, como se trata de um evento caracterizado pelo choque de um projétil em um alvo, as componentes de tensões hidrostáticas do tensor tensão são muito maiores do que as componentes cisalhantes, portanto apenas a matriz diagonalizada de tensões hidrostáticas é considerada [5].

O método de discretização escolhido para a análise foi o de Lagrange. Neste, a malha acompanha o movimento e a deformação do material, sendo o mais indicado para representar sólidos [6].

Durante a análise no software AUTODYN®, a equação constitutiva modelada por Johnson-Cook (1) é utilizada para descrever o comportamento das placas de aço e da jaqueta de Latão. É mostrada uma solução (Equação 1) para a influência da temperatura no comportamento do material neste tipo de evento dinâmico [7].

$$\sigma = [A + B \epsilon_p^n] [1 + C \ln \epsilon_p^*] [1 - (TH)^m] \quad (1)$$

Onde:

A é a tensão de escoamento inicial;

B, a constante de encruamento;

ϵ_p , a deformação plástica equivalente;

n, o expoente de encruamento;
 C, a constante da taxa de deformação;
 m, o expoente de amolecimento térmico;
 $\dot{\epsilon}^*$, a taxa de deformação plástica adimensional;
 TH, a temperaturahomóloga.

Sendo a temperatura homóloga (Equação2) definida como:

$$TH = (T - Tamb) / (Tmelt - Tamb) \quad (2)$$

Onde:

T é a temperatura instantânea;
 Tamb, a temperatura ambiente;
 Tmelt, a temperatura de fusão.

Para o Aço ABNT/AISI 4340: A= 7,92e+05 (KPa)
 B= 5,10e+05 (KPa) n= 0,26
 C= 0,014
 m= 1,03
 Troom=T0= 295,15 (K)
 Tmelt= 1793 (K)
 G (módulo de cisalhamento) = 8,18e+08 (KPa)

Para o Latão:

A= 1,12e+05 (KPa) B= 5,05e+05 (KPa) n= 0,42
 m= 1,68
 C= 0,009
 Tmelt= 1189 (K)
 Troom=T0= 295,15 (K)
 G (módulo de cisalhamento) =3,74e+07 (KPa)

Para descrever o comportamento do núcleo de Chumbo foi utilizado o modelo de resistência de Steinberg-Guinan (Equação3).

$$Y = Y0 \{1 + (YP / Y0) (P / \eta^{1/3}) + (GT / G0) (T - 300)\} (1+\beta\epsilon)^n \quad (3)$$

Onde:

Y é a tensão de escoamento;
 Y0, a tensão de escoamento inicial; YP, a derivada dY/dP;
 P, a pressão;
 η , a compressão, definida pela razão do volume específico inicial e o volume específico;
 GT, a derivada dG/dT, onde G é o modo de cisalhamento;
 G0, o módulo de cisalhamento inicial;
 T, a temperatura;
 β , o coeficiente de encruamento; ϵ , a deformação plástica;
 n, o expoente de encruamento.

Sendo:

Y0= 8,0e+3 (KPa)
 Y P= 9,304e-04

$G T = -9,976e+03$
 $G0 = 8,6e+06 \text{ (KPa)}$
 $\beta = 110$
 $n = 0,52$

Para o aço ABNT/AISI 4340 foi adotado o critério de falha de Johnson-Cook, o qual possui uma função de dano cumulativo (Equação4), sendo a erosão determinada a partir do critério de falha.

$$D = \sum (\Delta \epsilon_p / \epsilon^f) \quad (4)$$

Onde:

$\Delta \epsilon_p$ = Incremento da deformação plástica equivalente;

ϵ^f = Deformação de falha.

A falha é detectada quando a variável de dano D (parâmetro de dano) atinge o valor unitário, sendo a função deformação de falha (Equação5) definida por:

$$\epsilon^f = [D1 + D2 e^{D3 \sigma^*}] [1 + D4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 + D5 T^*] \quad (5)$$

Onde:

D1, D2, D3, D4, D5 são as constantes de dano;

σ^* , a razão entre a pressão e a tensão de escoamento;

$\dot{\epsilon}^*$, a taxa de deformação plástica adimensional;

T^* , a temperatura homóloga;

1º termo é a influência da pressão;

2º termo é a influência da taxa de deformação;

3º termo é a influência da temperatura.

Sendo: D1=0,05

D2=3,44

D3= -2,12

D4= 0,002

D5= 0,61

Para o Latão e o Chumbo a erosão é determinada a partir do “Geometric Strain”, onde ocorre erosão no material se o valor de deformação geométrica exceder o limite especificado, que nos modelos propostos foi considerado 1,0 para ambos os materiais.

Foi utilizada também a Equação de Estado (EOS) Linear para o aço, onde foram os parâmetros constantes da tabela a seguir (Tabela 1).

Tabela 1 Parâmetros do aço

“Bulk Modulus”	1,59e+08
Temperatura de Referência (K)	300
CalorEspecífico (J/kgK)	477,0
CondutividadeTérmica (J/mKs)	0,0

Para o Chumbo (Tabela 2) e o Latão (Tabela 3), a Equação de Estado (EOS) de Choque Linear foi utilizada, onde foram considerados os parâmetros a seguir.

Tabela 2 Parâmetros do Chumbo

Coeficiente de Gruneisen	2,74
Parâmetro C1 (m/s)	2,006e+03
Parâmetro S1	1,429
Temperatura de referência (K)	295,15
CalorEspecífico (J/kgK)	124

Tabela 3 Parâmetros do Latão

Coeficiente de Gruneisen	2,04
Parâmetro C1 (m/s)	3,726e+03
Parâmetro S1	1,434
Temperatura de referência (K)	295,15
CalorEspecífico (J/kgK)	385

2.2 Resultados

Foram analisados os impactos balísticos em placas plana e poliondular nas seguintes posições identificadas (Figura 2):

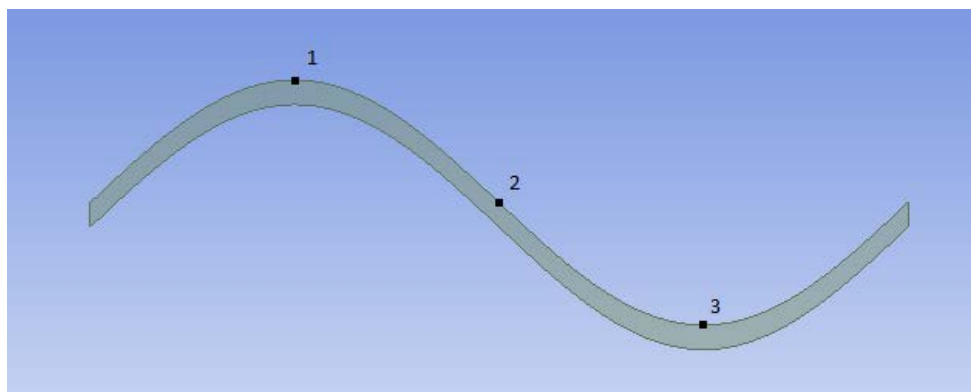


Figura 2. Posições de Impacto

Na simulação em placa plana (Figura 3), o modelo constituído de uma placa com 3872 elementos e 6075 nós e um projétil com 21460 elementos e 4305 nós.



Figura 3. Simulação em Placa Plana

Na simulação em placa poliondular na posição 1 (Figura 4), o modelo constituído de uma placa com 4386 elementos e 6864 nós e um projétil com 22925 elementos e 4571 nós.

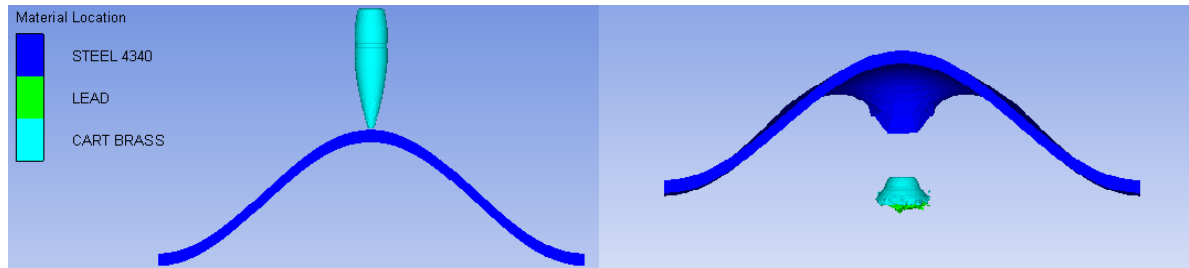


Figura 4. Simulação em Placa Poliondular (Posição 1)

Na simulação em placa poliondular na posição 2 (Figura 5), o modelo constituído de uma placa com 4284 elementos e 6708 nós e um projétil com 23180 elementos e 4578 nós.

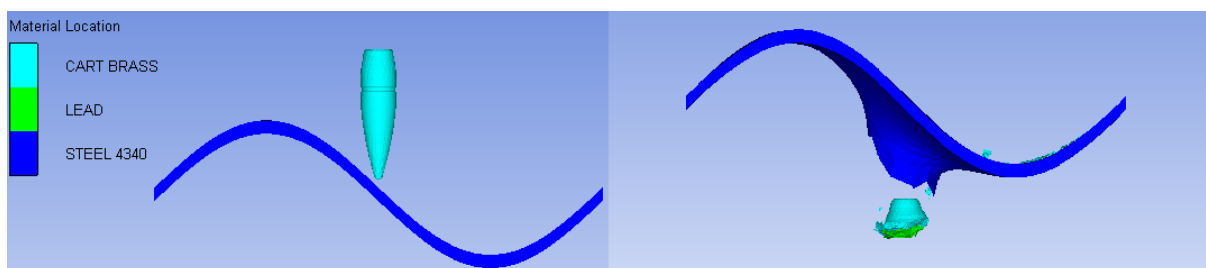


Figura 5. Simulação em Placa Poliondular (Posição 2)

Na simulação em placa poliondular na posição 3 (Figura 6), o modelo constituído de uma placa com 4386 elementos e 6864 nós e um projétil com 22925 elementos e 4571 nós.

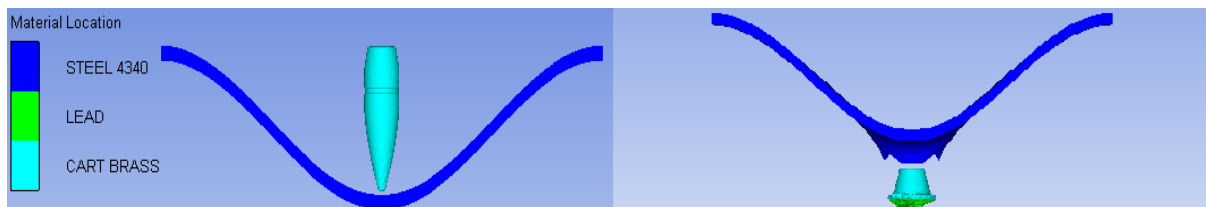


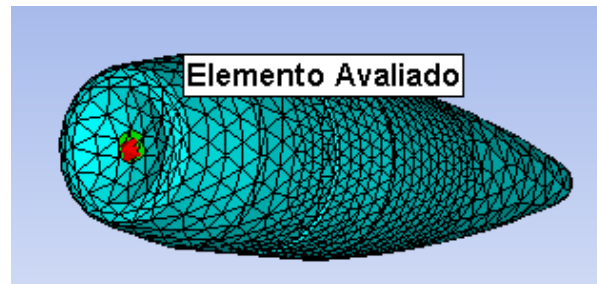
Figura 6. Simulação em Placa Poliondular (Posição 3)

São apresentados (Tabela 4) os resultados numéricos de velocidade residual do projétil, isto é, após atravessar o alvo, bem como a energia do projétil que foi absorvida pelo material da blindagem sobre as configurações de blindagem plana e poliondular. Neste caso, nos pontos 1 a 3 (Figura 2).

Os valores (Tabela 4) foram obtidos com base no elemento apresentado em vermelho (Figura 7). A escolha desse ponto foi porque está afastado da ponta do projétil, e por pertencer ao seu eixo central. Com isso, não sofre influência da velocidade de rotação e da erosão no impacto.

Tabela 4 Resultados numéricos sobre as configurações de blindagem

Posição	Velocidade Residual (m/s)	Energia Absorvida pela Placa (J)
Plana	758,2	620,53
1	670,55	844,52
2	695,98	627,33
3	742,75	714,55

**Figura 7.** Representação da Malha do Projétil

Embora o elemento escolhido esteja relativamente alinhado ao centro de massa do projétil, os resultados podem estar sofrendo influência da velocidade tangencial oriunda do movimento de rotação do mesmo. Em conformidade com a equação a seguir (Equação 6), o valor máximo para esta componente que pode afetar o resultado obtido é de aproximadamente 69 m/s.

$$V = \omega R \quad (6)$$

Onde:

V é a velocidade tangencial;

ω é a velocidade angular do projétil;

R é o raio do projétil.

Sendo:

$\omega = 17522 \text{ rad/s}$

$R = 3,92 \text{ mm}$

2.3 Discussão

Deve-se destacar que a simulação prevê a condição conservativa de que o projétil não sofre desvio na trajetória antes de atingir o alvo, o que na prática não é tão preciso, favorecendo a atuação da blindagem nas condições reais em relação à simulação.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se dizer que a superfície poliondular obteve melhores resultados a impactos balísticos em todas as posições em relação à placaplaca. Contudo o pior desempenho da placa poliondular foi na posição 3, apresentando comportamento próximo ao de uma placa plana, no que se refere à velocidade residual. No entanto, nesta mesma posição houve uma absorção maior de energia por parte da placa, o que significa que, embora a velocidade residual não tenha sofrido uma queda significativa, o projétil perdeu mais energia, pelo maior dano sobre o projétil ao atravessar o alvo.

Outro fato relevante observado durante as simulações, foi a deflexão do projétil ao impactar a posição 2 da placa poliondular, adquirindo uma componente de velocidade lateral de cerca de 17 m/s.

3 CONCLUSÃO

Com base nas simulações realizadas baseadas nas propriedades dos materiais do alvo e do projétil, é possível afirmar que uma configuração poliondular contribui significativamente para um aumento da proteção balística de uma placa metálica em relação a uma placa plana.

Pode-se também estabelecer uma diferença de desempenho em função da posição do impacto ao longo da placa poliondular, com um desvio de trajetória nos pontos onde a superfície apresenta-se inclinada em relação à trajetória do projétil.

O ponto de menor desempenho na placa poliondular foi a região de vale (posição 3), ainda assim superior à placa plana.

Agradecimentos

Ao Instituto Militar de Engenharia por propiciar os conhecimentos e instalações para o transcurso deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Mestrado concedida em 2017, número do processo 88882.184020/2018-01.

REFERÊNCIAS

1. Gomes AV. Comportamento balística da alumina com adição de nióbia e variação da geometria do alvo. [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia; 2004.
2. Trindade W. Influência da geometria e da microestrutura no comportamento dinâmico da alumina aditivada com nióbia.[tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia;2012.
3. Azevedo, AFM. Método dos Elementos Finitos. 1a Edição. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2003.
4. Lapa JAM. Análise Dinâmica Linear e Não-Linear de Estruturas.[dissertação de mestrado].Porto: Universidade do Porto; 1987.
5. Santos J. Simulação de Ensaio Balístico DOP. [dissertação de mestrado]. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia; 2012.
6. Santos VC. Uma Proposta de Metodologia para Otimização em Confiabilidade de Blindagem Aeronáutica a Partir de Simulações Computacionais.[tese de doutorado]. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá;2009.
7. Johnson, GR.; Cook, WH. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperature. 7th InternationalSymposiumonBallistics; 1983; The Hague, Netherlands. p.541-547.