

# Um Resumo sobre a Avaliação da Sensibilidade de Munições e Artefatos Bélicos

Rodrigo Roversi Rapozo

Instituto de Aeronáutica e Espaço, Praça Eduardo Gomes nº. 50, São José dos Campos, São Paulo.

**Resumo** — O Ciclo de Vida de um produto e a Segurança do Pessoal são de extrema importância em operações militares com emprego de armamento. Dessa maneira, desde sua concepção, o armamento moderno deve ser projetado de modo a responder com o menor impacto possível às ameaças às quais será exposto. Por outro lado, os armamentos já em operação devem ser avaliados, caso já não tenham sido, de modo que sejam levantadas as respostas para cada tipo de estímulo. Este artigo pretende revisar alguns aspectos da literatura e normatização existentes de modo a subsidiar futuros trabalhos de avaliação de resposta de munições às principais ameaças presentes no Ciclo de Vida de munições.

**Palavras-Chave** — Munições Insensíveis, Caracterização de Sensibilidade, Modelos Empíricos.

## I. INTRODUÇÃO

Com a crescente preocupação em redução de custos do Ciclo de Vida e Segurança do Pessoal no emprego de munições e sistemas de armas, as Munições Insensíveis (*Insensitive Munitions*, IM) vêm obtendo cada vez uma maior importância em novos desenvolvimentos [1]-[3]. Existem algumas normas disponíveis, destacando-se a STANAG 4439 [4] e a AOP-39 [5].

Embora uma munição que apresente reduzida vulnerabilidade e/ou sensibilidade a diversos estímulos possa ser classificada como IM, ela ainda deve ser avaliada em um cenário completo, a partir de um relatório de avaliação de perigo a ameaças (*Threat Hazard Assessment – THA*) [1], [2], começando pela natureza dos materiais, da própria composição dos explosivos, da munição integrada, suas embalagens e as condições de armazenamento e acondicionamento logísticos [3]-[9]. De modo a dar suporte a esse processo de avaliação, a Árvore de Falha do sistema completo e de seus subsistemas é uma ferramenta útil para determinar os parâmetros de vulnerabilidade ao longo do Ciclo de Vida [1].

A THA prevê inicialmente a lista das ameaças a que determinada munição estaria sujeita ao longo do seu Ciclo de Vida. Por sua vez, as avaliações são realizadas nos subsistemas ativos principais que, para o caso de um míssil tático [10] são o Motor Foguete (MF) e a Cabeça de Guerra (CDG).

Entretanto, a escolha por um projeto de MF ou CDG com características IM implicarão em consequências logísticas para o Sistema de Armas, aumentando o potencial para um armazenamento diferenciado e novos requisitos de transporte e manuseio.

Para materiais energéticos de um modo gerais, apesar dos novos desenvolvimentos de aglutinantes (binders) energéticos e mesmo de aditivos [11], [12], as formulações com PBLH e outros aglutinantes inertes ainda vêm sendo as preferidas [13], [14].

No contexto de MF a propelente sólido (MFS), partindo-se do pressuposto de que a propulsão de uma munição IM é dependente da composição do propelente, da configuração do grão e do tipo de carregamento (longitudinalmente colado ou encartuchado), o MFS deve ser desenvolvido em combinação com o Envelope Motor (EM), Proteções Térmicas (PT), adesivos, uniões e juntas de interface, materiais do ignitor, projeto dos elementos do ignitor e fixação da tubeira [15].

Assim como nos Alto Explosivos, as formulações de propelentes sólidos do tipo composite têm levado ao estudo de binders energéticos e de oxidantes alternativos ao Perclorato de Amônio (PCA) [2], [11], [14], [16]-[17]. Entretanto, as formulações consagradas empregam o PCA devido ao seu maior desempenho e o Polibutadieno Hidroxilado (PBLH) devido a suas características superiores de resistência, vulnerabilidade e níveis de envelhecimento [2], [11], [18]-[19].

Em resumo, os tipos de reação inadvertida de uma munição (artefato bélico) a um dado estímulo são:

1. Queima (Tipo V): fenômeno lento e sem expulsão de fragmentos;
2. Deflagração (Tipo IV): propulsão sem ruptura do envelope motor do MF ou do envelope da CDG, não ocorrendo expulsão de fragmentos para uma área maior do que a ocupada pelo artefato;
3. Explosão (Tipo III): fenômeno rápido, com expulsão de fragmentos e geração de ondas de choque, embora de menor violência do que aquelas geradas na detonação do artefato;
4. Detonação Parcial (Tipo II): fenômeno rápido, com expulsão de fragmentos e geração de violentas ondas de choque, vindo a acarretar danos inferiores ao da detonação total do artefato. O nível de dano depende da região do artefato onde se inicia a reação;

5. Detonação Total (Tipo I): fenômeno rápido, com expulsão de fragmentos e geração de violentas ondas de choque, vindo a acarretar danos em maior escala do que os anteriores, visto que todo o conteúdo explosivo vem a reagir.

#### Especificação de Ensaio IM

A título deste trabalho, para caracterização da sensibilidade do MF e da CDG a estímulos/ameaças externos, serão considerados cinco tipos de testes, a saber:

1. Impacto de Projétil (*Bullet Impact*, BI): fenômeno associado a iterações dos artefatos dado o impacto de projétil proveniente de outra munição;
2. Impacto de Fragmento (*Fragment Impact*, FI): fenômeno associado a iterações dos artefatos dado o impacto de fragmento proveniente da detonação de outra munição ou relacionado a atividades que venham a projetar fragmentos na área do artefato;
3. Aquecimento Rápido (*Fast Cook-off*, FCO): ação devida a uma exposição direta de combustível queimando;
4. Aquecimento Lento (*Slow Cook-Off*, SCO): aquecimento do artefato por exposição à fonte geradora de calor cujo fluxo de calor é inferior àquele gerado por contato direto com combustível queimando; e
5. Teste de Detonação por Simpatia (*Sympathetic Detonation*, SDT): fenômeno associado a iterações dos artefatos a ondas de choque provenientes de outra detonação nas proximidades do artefato.

Outra ameaça que poderia ser adicionada à esta lista seria a de impacto por carga oca (*shaped-charge jet impact*, SCJI). A resposta esperada para SCJI é sempre do Tipo I (detonação total), de modo que os respectivos ensaios não serão considerados [20].

Na Tabela 1 são resumidas as condições dos ensaios de acordo com as normas selecionadas [20]-[26].

TABELA 1. Descrição dos Ensaio de Caracterização de Sensibilidade.	
Ensaio	Descrição Resumida
BI	Munição do tipo M2, calibre 0.50 posicionada a 20 m do alvo, com velocidade de impacto de $850 \pm 20$ m/s, perpendicular ao eixo longitudinal do artefato.
FI	Fragmento cilíndrico com ponta cônica, com diâmetro de 12,7 mm, a $1830 \pm 60$ m/s sendo impulsionado por carga explosiva, orientado em direção ao centro de maior área apresentada no artefato.
FCO	Uso de combustível padronizado, com exposição à maior área apresentada do artefato.
SCO	Climatização e aquecimento do artefato a partir da temperatura ambiente até a ocorrência de algum tipo de resposta. A taxa de aquecimento será $25^\circ\text{C/h}$ .
SDT	A ser realizado no conjunto integrado MF+CDG (representativo de um míssil completo).

Para a avaliação da ameaça SDT, os itens serão posicionados lado a lado, assumindo-se uma distribuição esférica da onda de choque. Encontra-se em avaliação o tipo de carga ou munição a fornecer o estímulo, assim como os artefatos inertes a serem posicionados nas proximidades.

Duas distâncias serão observadas, de acordo com procedimentos de armazenamento a serem levantados. Para a avaliação da ameaça SDT, os itens serão posicionados lado a lado, assumindo-se uma distribuição esférica da onda de choque. Encontra-se em avaliação o tipo de carga ou munição a fornecer o estímulo, assim como os artefatos inertes a serem posicionados nas proximidades. Duas distâncias serão observadas, de acordo com procedimentos de armazenamento a serem levantados.

A Figura 1 apresenta um esquema do ensaio SDT, extraído da norma STANAG 4241 [26].

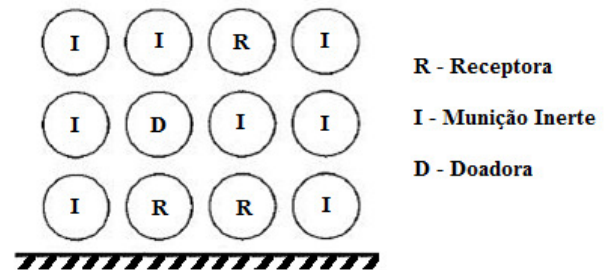


Fig 1. Esquema para os ensaios SDT.

Definidas as ameaças e os ensaios, resta agora realizar uma avaliação dos fenômenos que os governam.

#### Fenômenos Físicos Envolvidos

O conhecimento do tipo de ameaça a que um MF ou uma CDG podem ser submetidos deve influenciar diretamente o time de projeto a escolher soluções de projeto a serem utilizadas ao longo do desenvolvimento destes.

Embora muitos dos fenômenos físicos envolvidos ainda não sejam completamente compreendidos pela comunidade científica e, devido a sua não linearidade intrínseca, impossibilitam a criação de modelos analíticos, alguns modelos empíricos apresentam-se à disposição [3]. Tais modelos, apesar de inexatos, apresentam suficiente conformidade com dados experimentais. Entretanto, muitos dos parâmetros são específicos de determinados materiais e/ou classes de materiais, de modo que, no desenvolvimento de novos produtos, muitos desses parâmetros devem ser estimados a partir dessas classes de materiais.

De modo geral, a escala de tempo para a evolução completa de cada reação leva a determinado tipo de fenômeno é apresentada na Tabela 2.

TABELA 2. Escala de Tempo para determinada Reação [3].	
Descrição do Fenômeno	Tempo Aproximado
Detonação (Total ou Parcial)	1 – 5 $\mu\text{s}$
Transição Retardada para Detonação (XDT)	~ 1 ms
Transição Deflagração-Detonação (DDT)	> 1 ms
Deflagração (com ou sem propulsão do artefato)	30 ms a 1 s
Pirólise (Queima)	> 1 s

O fenômeno mais comum, associado a explosivos (e propelentes confinados) é a Transição para Detonação devido a uma onda de choque (*Shock-to-Detonation Transition*, SDT). Essa é a base para a detonação de explosivos secundários, embora ocorra também em propelentes.

Contudo, na Tabela 2 aparece a Transição Retardada para Detonação (*Delayed-Detonation Transition*), geralmente causada por um mecanismo desconhecido, o que levou a esse fenômeno ser designado por XDT, sendo verificado frequentemente em propelentes. Outro fenômeno apresentado é a Transição da Deflagração para a Detonação (*Deflagration-to-Detonation Transition*, DDT), relacionado com o grau de confinamento e porosidade dos materiais energéticos (explosivos, propelentes e pirotécnicos), a ser aplicado quando o material se encontra em decomposição em função do tempo e temperatura externa.

Devido a limitações para a publicação no SIGE, os comentários referentes a BI e FI foram suprimidos.

## II. CRITÉRIOS PARA INICIAÇÃO, DEFLAGRAÇÃO E DETONAÇÃO

Os critérios adotados para iniciação, deflagração e detonação envolvem a temperatura crítica de iniciação ( $T_{CR}$ ), para eventos onde o tempo para que a reação ocorra é relativamente grande, temperatura de ignição ( $T_{IG}$ ), quando o tempo de reação é muito pequeno, e a energia crítica para que a detonação ocorra ( $E_{CR}$ ). O efeito da reação depende também do diâmetro crítico do material [3], [27].

### Aquecimento Externo

Tratando-se de aquecimento por fonte externa, a equação da energia em um material energético em decomposição é dada por:

$$-\lambda \cdot \nabla^2 T + \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} + u \cdot \frac{dT}{dz} = q_{CH} \quad (1)$$

Onde  $\lambda$  é a condutividade térmica,  $\rho$  é a massa específica,  $c_p$  é o calor específico à pressão constante,  $T$  é a temperatura,  $u$  é a velocidade do escoamento,  $z$  é o eixo longitudinal e  $q_{CH}$  é a taxa de calor da reação por unidade de volume, definido para uma reação química de ordem zero como sendo:

$$q_{CH} = \rho \cdot \Delta H_{CH} \cdot A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

Em (2),  $\Delta H_{CH}$  é a entalpia de reação por unidade de massa,  $E_a$  é a energia de ativação,  $R$  é a constante universal dos gases e  $A$  é a constante de reação. Caso não exista escoamento devido a fusão do material,  $u$  é igual a zero e (1) pode ser reescrita:

$$-\lambda \cdot \nabla^2 T + \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = q_{CH} \quad (3)$$

Fazendo-se  $t$  tendendo a infinito em (3), pode-se obter um valor de temperatura, definido como temperatura crítica de iniciação ( $T_{CR}$ ) [28]:

$$\frac{E_a}{R \cdot T_{CR}} = \ln \left( \frac{d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{E_a}{R} \cdot \frac{\Delta H_{CH}}{T_{CR}^2} \cdot \frac{A}{\delta} \right) \quad (4)$$

Sendo  $d$  o diâmetro do material da carga e  $\delta$  um fator geométrico, igual a 2 para cilindros, 3,32 para esferas e 0,88 para "slabs" (elementos onde a espessura é infinitamente inferior às demais dimensões). A temperatura  $T_{CR}$  é conhecida como temperatura de auto-ignição e seu uso permite elaborar modelos para aquecimento lento (SCO).

O tipo de reação da munição vai depender de vários fatores, levando a mecanismos de DDT ou XDT, para o caso de detonação, explosão devido à ruptura abrupta/completa do EM ou simples queima, com ruptura local do EM, gerando pontos de escape dos gases, liberando-os para expandirem-se livremente.

A pressão no interior do artefato pode ser calculada por meio de equações de estado. Dentre elas, destaca-se a equação de Noble-Able [27], adaptada da equação original, baseada no covolume dos gases:

$$P \cdot (V - 0,025 \cdot n_{Mol}) = n_{Mol} \cdot R \cdot T \quad (5)$$

Onde  $V$  é o volume dos gases gerados e  $n_{Mol}$  é o número de moles dos gases. Por sua vez, a evolução da pressão no tempo é dada pela equação:

$$\frac{dP_C}{dt} = \frac{R_G \cdot T_C}{V_L} \cdot \left( \frac{dm_p}{dt} - \frac{dm_v}{dt} \right) \quad (6)$$

Em (8)  $dm_v/dt$  é a vazão mássica dos gases ejetados por orifícios no EM. Essa análise pode ser estendida a explosivos. Caso o EM não apresente orifícios até a ruptura, o termo  $dm_v/dt$  é nulo. A vazão mássica do propelente (ou explosivo), pode ser expressa por:

$$\frac{dm_p}{dt} = \rho_p \cdot A_B \cdot V_b = \rho_p \cdot A_B \cdot a \cdot P_C^n \quad (7)$$

Logo, o mecanismo de evolução da pressão vai definir o comportamento estrutural do EM. A detonação em si vai depender da condição de energia crítica no material ( $E_{CR}$ ), definida em unidades de energia por unidade de área ( $E_{CR}^A$ ) ou por unidade de volume ( $E_{CR}^V$ ) e do diâmetro crítico do material ( $d_{CR}$ ).

A expressão (8) apresenta um modelo para estimar a pressão interna efetiva em um vazo de pressão na ruptura:

$$P_{CB} = \frac{d}{2 \cdot V_S} \cdot \frac{dP_C}{dt} + P_H \quad (8)$$

Onde  $P_{CB}$  é a pressão hidrostática de ruptura do EM,  $P_H$  é a pressão na câmara de combustão na ruptura do EM e  $V_S$  é a velocidade do som no interior no material energético.

Em gradientes de pressão elevados, a resposta do EM deve ser comparada com sua resistência dinâmica ao escoamento, aproximadamente 1 GPa para o alumínio e entre 2,4 a 2,8 GPa para aços.

### Aquecimento Rápido

O aquecimento rápido possui o agravante de ser localizado e não uniformemente distribuído, conforme a Figura 2, que mostra o caso de um MF. Nota-se o descolamento entre o liner e o propelente.

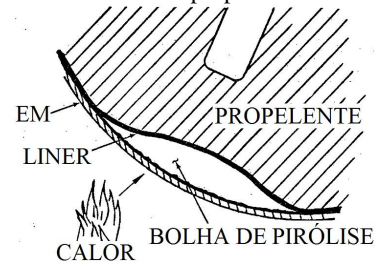


Fig 2. Resposta Física do MF durante estágio inicial de Aquecimento Rápido. Adaptado de Cocchiari [28].

O ambiente de aquecimento rápido (Figura 2), provê um elevado gradiente de temperatura na parede externa do EM que se propaga até a área de passagem do grão propelente. O liner e as proteções térmicas sofrem pirólise (decomposição térmica) que, em conjunto com a eventual expansão térmica do EM, levam ao descolamento gerando uma bolha de gases pressurizados antes que ocorra um aquecimento suficiente do propelente e sua eventual expansão. O gás enclausurado pode diminuir a transferência de calor ao propelente mas, como a temperatura de chama do liner é suficientemente alta, os gases em contato podem produzir um ponto quente no MF, levando à sua eventual deflagração. Dessa maneira, podem ocorrer os possíveis eventos ao longo do tempo [28]:

1. a pressão gerada pelos gases pode romper o EM, gerando pontos de ventilação;
2. os gases gerados podem comprimir o propelente, levando à falha estrutural (fratura do grão);
3. os gases de pirólise podem levar à separação do isolamento com o EM.

O primeiro caso leva a uma queima à pressão ambiente, que consiste em reação do tipo V. O segundo e terceiro casos levam à pirólise a quente do propelente ou a combustão que desencadearia a ignição de pequenas porções no interior do propelente. Fazendo uso das equações (5) e (6), o gradiente de pressão depende inversamente do volume livre no interior do propelente e diretamente à área de queima. Quanto menor a porção ignitada, maior será esse gradiente de pressão. O confinamento leva a deformações plásticas de maior magnitude, produzindo ondas de choque no interior do propelente, o que pode causar o mecanismo conhecido por DDT. A resposta final do evento dependerá [3], [28]:

1. da área de propelente exposta, principalmente no caso de fratura inicial;
2. do número de focos de fratura;
3. da resistência estrutural dinâmica do EM (pontos de ventilação ou ruptura/explosão);
4. da resistência estrutural das interfaces do isolamento com o EM, do isolamento com o liner e do liner com o propelente (responsáveis por definir o carregamento dinâmico no grão);
5. da lei de queima do isolamento/liner e propelente (expoentes 'n');
6. da ignitabilidade do propelente ( $T_{IG}$ );
7. do diâmetro crítico do propelente ( $d_{CR}$ ), para avaliar a ocorrência de DDT.

A Figura 3 exemplifica o caso de deformação de meia seção do propelente devido a bolha de gases proveniente da pirólise do isolamento térmico.

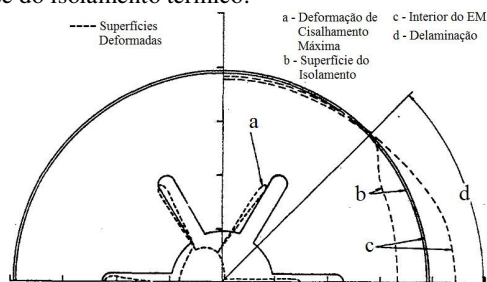
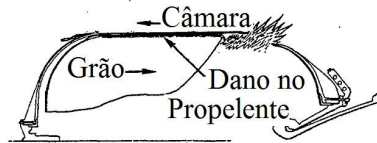


Fig 3. Deformação do propelente devido a pirólise do isolamento térmico. Adaptado de Cocchiario[28].

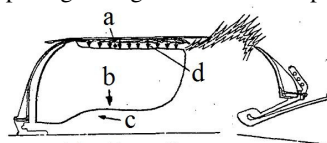
Na Figura 4 ilustra-se o caso de ruptura do domo após falha por cisalhamento na interface propelente/isolamento térmico/EM, levando ao mecanismo DDT.



**CISALHAMENTO**  
- Ruptura do Domo  
- Cisalhamento Propelente/EM  
- DDT na interface cisalhada

Fig 4. Exemplo de DDT após falha por elevado cisalhamento na interface propelente/EM. Adaptado de Cocchiario[28].

O mecanismo de falha por cisalhamento na interface propelente/isolamento térmico/EM, gerando um elevado gradiente de pressão, fechamento da porta central/área de passagem seguido de DDT é apresentado na figura 5.



**IMPLOÇÃO**  
- Falha da interface isolamento/propelente  
- Elevado diferencial de pressão  
- Fechamento da porta de passagem  
- Fragmentação e DDT (Lenta)  
- Detonação por Impacto Propelente/Propelente (Rápida)

Fig 5. Exemplo de DDT após implosão do grão propelente e consequente detonação. Adaptado de Cocchiario[28].

Quanto ao tipo de reação esperada, este depende das mesmas condições destacadas para o aquecimento lento.

### III. ENERGIA CRÍTICA

*Relação Energia-Potência para Artefato sob Aquecimento* [27]

Seja  $q$  a taxa de calor a qual o artefato encontra-se sob exposição:

$$q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} + \lambda \cdot T \quad (9)$$

Considerando-se um ponto quente na superfície do material energético com temperatura  $T_{IG}$  gerado em um intervalo de tempo infinitesimal. Para essa condição, a integral de (9) no tempo é:

$$E_{CR}^V = \rho \cdot c_p \cdot (T_{IG} - T_a) \quad (10)$$

Nessa condição, o material sofrerá deflagração ou detonação, sendo  $E_{CR}^V$  a energia crítica por unidade de volume.

Para um aquecimento do artefato em regime estacionário ( $dT/dt = 0$ ), seja um valor de  $q$  tal que a máxima temperatura atingida na superfície seja  $T < T_{IG}$ . Nesse caso, existe a possibilidade do material não ser iniciado. Para essa condição, tem-se  $q = Pot_{CR}$  (potência crítica):

$$q = Pot_{CR} = \lambda \cdot T \quad (11)$$

O uso da relação entre energia e potência vem da teoria de iniciadores não elétricos [27] e leva a uma relação hiperbólica, representada na Figura 6.

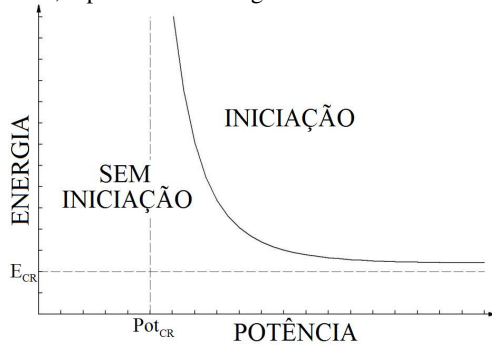


Fig 6. Representação da Relação entre Energia e Potência [27].

#### Exposição a onda de choque

O critério de energia crítica ( $E_{CR}$ ) para iniciação de explosivos para ação de onda de choque (SDT) estabelece que:

$$E_{CR} = B \cdot P^m \cdot t \quad (12)$$

Em (12), o coeficiente 'b' trata-se apenas de um coeficiente de ajuste, sendo 't' o intervalo de duração da exposição.

Segundo Victor [3], bons resultados são atingidos utilizando-se o expoente 'm' próximo de 2.

Caso a energia seja insuficiente, não ocorrerá detonação, devendo ocorrer deflagração ou combustão lenta. Existe ainda a possibilidade da reação ser extinta antes do consumo total do material.

A pressão da onda transmitida, que vale também para o caso de impacto de um objeto ( $P_T$ ), relaciona-se com a pressão de onda incidente ( $P_I$ ), no caso unidimensional [29], pela relação:

$$\frac{P_T}{P_I} = \frac{2 \cdot K_1}{K_1 + K_2} \quad (13)$$

Sendo  $K_1$  e  $K_2$  as impedâncias de choque na superfície impactada e no material subsequente:

$$K = \rho \cdot U \quad (14)$$

Onde  $U$  é a velocidade da onda de choque. Outro fator importante é a pressão da onda refletida ( $P_R$ ), denominada onda de rarefação:

$$\frac{P_R}{P_I} = \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1} \quad (15)$$

Dependendo da relação entre as impedâncias  $K$ , diversas iterações podem ocorrer no interior do explosivo, de modo que a intensidade da onda final e a duração do choque podem elevar a energia até  $E_{CR}$ . No modelamento do fenômeno, deve-se ter um conhecimento o mais preciso possível das propriedades dos materiais envolvidos.

Em termos físicos, as ondas de rarefação viajando no interior do explosivo causam o tensionamento do material, que encontra-se inicialmente sob compressão da onda de choque original, implicando na ocorrência de microfissuras no material, de maneira semelhante ao descrito para o

aquecimento rápido, podendo levar ao mecanismo de SDT. Como foi observado na Tabela 2, a diferença entre os mecanismos DDT e SDT é determinada apenas pela duração do fenômeno.

#### Detonação por Simpatia

Observadas as condições da Energia Crítica e Diâmetro Crítico, pode-se iniciar a discussão sobre a SDT. No entanto, algumas considerações adicionais devem ser tomadas, assumindo-se que a onda de choque é transmitida ao EM receptor por impacto de um grande fragmento plano ou cilíndrico. Em caso de impacto direto (*one-on-one*), o EM doador expande-se radialmente com velocidade  $V_R$ . Para o caso da presença de outras munições em contato com o receptor, assume-se que este apresenta distorções em função do contato, assumindo uma face plana no momento de encontro com o fragmento gerado pelo doador.

Para o caso de impacto direto:

$$\frac{V_R}{V_G} = \max \left\{ \frac{V_0}{V_G}, \left\{ K_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_D}{D_E} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \right\} < 1 \quad (16)$$

Em (16),  $V_G$  é a velocidade Gurney do MF ou CDG,  $V_0$  é a velocidade teórica do EM,  $K_0$  é uma constante do explosivo,  $D_D$  é o diâmetro original do EM e  $D_E$  é o diâmetro expandido. Para explosivos capazes de liberar a energia total na explosão,  $K_0$  é igual a 1,35.

A velocidade Gurney pode ser calculada por:

$$V_G = \sqrt{\frac{2 \cdot E_K}{\left( \frac{M_C}{M_E} + \frac{\kappa}{\kappa + 2} \right)}} \quad (17)$$

Onde  $E_K$  é a energia Gurney do explosivo,  $M_E$  é a massa do explosivo,  $M_C$  é a massa do EM e  $\kappa$  é um fator de geometria da carga, sendo 1 para o explosivo plano posicionado duas placas paralelas a ele, 2 para cilindros e 3 para esferas. A energia Gurney de um explosivo pode ser estimada por [27]:

$$\sqrt{2 \cdot E_K} = \frac{V_D}{2,97} \quad (18)$$

Sendo  $V_D$  a Velocidade de detonação. Em (16), a velocidade  $V_0$  é aproximada por:

$$V_0 \approx \left[ \sqrt{\frac{c_{0C}^2}{4 \cdot s_C^2} + \frac{P_{CJ}}{s_C \cdot (\rho_C + \rho_E)}} - \frac{c_{0C}}{2 \cdot s_C} \right] \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{e_C}{D_D} \right) \quad (19)$$

Na expressão (19),  $P_{CJ}$  é a pressão de detonação (Chapman-Jouguet), determinada em função da velocidade de detonação e da densidade [27]:

$$P_{CJ} = \rho_0 \cdot V_D \cdot (1 - 0,7125 \cdot \rho_0^{0,04}) \quad (20)$$

Para o caso de um fragmento plano contra um cilindro, a largura efetiva mínima exigida para levar à detonação ( $d_{EF}$ ) é expressa por [3]:

$$d_{EF} = D_A \cdot \frac{V_R}{c_{0C}} \quad (21)$$

Onde  $D_A$  é o diâmetro do cilindro receptor. No caso de impacto de cilindro contra cilindro, utiliza-se a expressão [3]:

$$d_{EF} = D_A \cdot \frac{V_R}{c_{OC}} \cdot \frac{L + D_D/2}{L + D_A/2 + D_D/2} \quad (22)$$

Para L sendo a distância entre os EM doador e receptor.

#### IV. COMENTÁRIOS ADICIONAIS

Em resumo, para um MFS, o projeto do isolamento térmico e do liner, além da necessidade de evitar a transmissão de calor ao propelente nas condições de operação do MF e de garantir a adesão ao EM e ao propelente durante o regime de manobras, deve ainda possibilitar que o propelente mantenha a sua integridade pelo maior tempo possível e gerar o menor nível de resposta.

Por outro lado, o EM deve ser otimizado para conter a pressão gerada pelos gases de combustão do propelente, resistir ao carregamento esperado durante a operação do míssil, possuir suficiente resistência à fadiga (incluindo ambiente corrosivo), minimizar o peso inerte do MF e, ainda, minimizar as respostas frente às possíveis ameaças externas, permitindo queima a temperatura ambiente (ventilação).

Finalmente, o propelente, além de possuir o desempenho esperado, deve possuir suficiente integridade estrutural e comportamento sob flexão, pressão e compressão, para cada ambiente operacional, além de possuir aceitáveis limites de ignitabilidade de modo a reduzir o nível de resposta às possíveis ameaças externas.

As mesmas considerações para o MF são válidas para a CDG, com relação aos materiais em contato. Portanto, para realizar uma modelagem faz-se necessário um estudo detalhado das ameaças, para levantamento dos fenômenos físicos envolvidos, aliados à caracterização termoquímica dos componentes de cada subsistema (isolamento térmico, liner, EM/housing, propelente, explosivo).

Concluindo, a IMC possui uma elevada importância no requisito de segurança de pessoal e instalações, influenciado no conceito e projeto dos subsistemas MF e CDG. A modelagem dos fenômenos físicos envolvidos para cada ameaça torna-se um assunto complexo que exige a maior quantidade possível de dados referentes aos subsistemas e componentes.

Em trabalhos futuros pretende-se compilar todas as propriedades dos componentes de um MF e de uma CDG disponíveis na literatura, tornando possível a verificação dos modelos apresentados, a partir de simulações numéricas.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Y. Guengant, M. Rat, B. Mahe, "Munitions Vulnerability Assessment along their Life Cycle – Methods & Results", apresentado no 2006 IMEMTS, Bristol, Reino Unido, 2006.
- [2] J. P. Sutton, O. Bibalrz. "Rocket Propulsion Technology", 7th ed, John Wiley & Sons: Nova Iorque, 2001, p. 458–493.
- [3] A. C. Victor. "Insensitive Munitions for Solid Rocket Motors" in Tactical Missile Propulsion, ed. I. G. E. Jensen, B. H. Prescott, S. O. Leisch, J. G. Laurent, and D. W. Netzer, AIAA: Virginia, 1996, p. 273–361.
- [4] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Policy for Introduction and Assessment of Insensitive Munitions (IM)". Bélgica. STANAG 4439, Rev. 3, março 2010.
- [5] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Guidance on the Development, Assessment and Testing of Insensitive Munitions (IM)". Belgium. AOP-39, ed. 3, março 2010.
- [6] R. E. Bowen, J. M. Ward, E. A. Daugherty. "The Interrelationships between Qualification, Insensitive Munitions and Hazard Classification Testing of Explosives (High Explosives, Propellants and Pyrotechnics)". Anais do 25º Expl. Safety Seminar. EUA, vol. 3, p. 374–383, agosto 1992.
- [7] Department of Defense. "Ammunition and Explosives Hazard Classification Procedures". USA. TB 700-2 NAVSEA 8020.8B, janeiro 1998.
- [8] A. Stanton, "Insensitive Munitions Packaging Options", apresentado no 1st Annual NCRES, MD, EUA, 2009.
- [9] C. Spycerelle, C. Songy, G. Eck. "IM Melt Cast Compositions based on NTO". 2010 IMEMTS, Munique, outubro 2010.
- [10] FLEEMAN, E.L. Tactical Missile Design, Lilburn: AIAA, 2006.
- [11] N. Kubota. "Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion", 2nd ed. Wiley-VCH: Weinheim, 2007, pp. 33, 82, 262–264, 287–300.
- [12] 2-15 J. S. Lee, C. K. Hsu. "Thermal properties and shelf life of HMX-HTPB based plastic-bonded explosives". Therm. Acta, No. 392-393, p. 153–156, 2002.
- [13] A. D. Merran, "Polyurethane Binder Systems for Polymer Bonded Explosives", DSTO-GD-0492. DSTO: Australia, 2006, p.1–14.
- [14] I. J. Lochert, R. M. Dexter, B. L. Hamshere, "Evaluation of Australian RDX in PBXN-109", DSTO-TN-0440. DSTO: Australia, 2002, p.2–13.
- [15] K. Nofer, C. Jones, C. Allen, "Application of IM Technology to the Aerojet/Roxel Rocket Motor for Joint Common Missile", apresentado no 2006 IMEMTS, Bristol, Reino Unido, 2006.
- [16] C. Nguyen, F. Morin, F. Hiernard, Y. Guengant. "High Performance Aluminized GAP-based Propellants – IM Results", 2010 IMEMTS, Munique, Alemanha, outubro 2010.
- [17] Horst, A. W. et al. "Insensitive High Energy Propellants for Advanced Gun Concepts", ARL-TR-2584. Weapons and Materials Research Institute. Aberdeen, 2001, p. 3–9.
- [18] M. Kivity, G. Hartman, A. M. Achlama, "Ageing of HTPB Propellant", 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE JPC & Exhibit, AIAA 2005-3802, p.1–6, Julho 2005.
- [19] S. B. Navale, S. Sriraman, V. S. Wani, M. V. Manohar, S. D. Kakade. "Effects of Additives on Liner Properties of Case-bonded Composite Propellants". Def. Sc. J., Vol. 54, No. 3, p. 353–359. July 2004.
- [20] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Shaped Charge Jet, Munitions Test Procedure". Bélgica. STANAG 4526, ed. 1, Março 2010.
- [21] Departamento de Defesa. *Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions*. Norma MIL-STD-2105, Revisão C, EUA, Julho de 2003.
- [22] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Bullet Impact, Muniton Test Procedures". Bélgica. STANAG 4241, ed. 2, abril 2003.
- [23] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Fragment Impact, Muniton Test Procedures". Bélgica. STANAG 4496, ed. 1, dezembro 2006.
- [24] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Liquid Fuel/External Fire, Muniton Test Procedures". Bélgica. STANAG 4240, ed. 2, abril 2003.
- [25] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Slow Heating, Muniton Test Procedures". Bélgica. STANAG 4382, ed. 2, abril 2003.
- [26] Standardization Agreement of North Atlantic Treaty Organization. "Sympathetic Reaction, Muniton Test Procedures". Bélgica. STANAG 4241, ed. 2, abril 2003.
- [27] Cooper, P. W., "Explosives engineering", Wiley-VCH, Inc., Nova Iorque, EUA, 1996.
- [28] Cocciaro, J. E. "Subscale Fast Cookoff Testing and Modeling for the Hazard Assessment of Large Rocket Motors", CPIA, EUA, 2001.
- [29] Shin, H. et al. "A numerical study on the detonation behavior of double reactive cassettes by impacts of projectiles with different nose shapes". International Journal of Impact Engineering, Vol 28, p. 349-362, Pergamon Press, 2003.