O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratizacão mundial do conhecimento.



BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano VI | Volume 17 | Nº 51 | Boa Vista | 2024

http://www.ioles.com.br/boca

ISSN: 2675-1488

https://doi.org/10.5281/zenodo.10963310

BOLETIM DE CONJUNTURA

www.ioles.com.br/boca

DESAFIOS E ESTRATÉGIAS NO MONITORAMENTO DE MUNIÇÕES: UMA ANÁLISE COMPARATIVA BRASIL-EUA[1]

José Daniel Langendorf da Silva[2]

Rodrigo Leonard Barbosa Rodrigues[3]

Jakler Nichele[4]

Fernando Cunha Peixoto[5]

Resumo

Este estudo compara os métodos de monitoramento de munições do Exército Brasileiro (EB) e do Exército dos Estados Unidos (USA – United States Army), a fim de identificar oportunidades de melhoria no modo como são geridos os estoques desses materiais no Brasil. A pesquisa se concentra em detalhar as características básicas das atividades de inspeção, provas de funcionamento e exames laboratoriais dos referidos sistemas de gestão, utilizando os critérios de flexibilidade e economicidade como parâmetros principais de comparação. Os achados revelam que a abordagem mais flexível empregada pelos EUA na condução dessas atividades contribui para a maior eficiência e sustentabilidade de seus estoques, contrastando com a metodologia mais tradicional adotada pelo EB. Ao final, conclui-se pela integração de métodos complementares de análise, pelo uso de sistemas móveis para testes em campo e pela atualização das diretrizes regulatórias nacionais, a fim de promover maior segurança e melhor economia na gestão das munições do EB.

Palavras-chave: Desempenho e Segurança das Munições; Estabilidade de Pólvoras; Exército Brasileiro; Monitoramento das Munições.

Abstract

This study compares the ammunition surveillance methods of the Brazilian Army (EB – Exército Brasileiro) and the Army of the United States (EUA – Estados Unidos), aiming to identify opportunities for improvement in the management of ammunition stocks in Brazil. The research focuses on detailing the basic characteristics of inspection activities, functional tests, and laboratory examinations of the mentioned management systems, using flexibility and cost-effectiveness as the main comparison parameters. The findings reveal that the more flexible approach employed by the USA in conducting these activities contributes to greater efficiency and sustainability of its stocks, contrasting with the more traditional methodology adopted by the EB. In conclusion, it is suggested the integration of complementary analysis methods, the use of mobile systems for field testing, and the updating of national regulatory guidelines, to promote greater safety and better economy in the management of the EB's ammunition.

Keywords: Ammunition Surveillance; Brazilian Army; Performance and Safety of Ammunition; Propellant Stability.

[1] Os autores agradecem ao apoio institucional da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

[2] Mestrando em Química pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Email: langendorf.daniel@ime.eb.br

[3] Diretor do Instituto de Defesa Química, Radiológica, Biológica e Nuclear (IDQBRN). Doutor em Química. Email: rodrigues@ime.eb.br

[4] Docente do Instituto Militar de Engenharia (IME). Doutor em Engenharia de Defesa. Email: jakler@ime.eb.br

[5] Docente do Instituto Militar de Engenharia (IME). Doutor em Engenharia de Processos. Email: fpeixoto@ime.eb.br

INTRODUÇÃO

O armazenamento prolongado de munições impõe desafios significativos à eficácia operacional das Forças Armadas, especialmente devido à susceptibilidade desses materiais à degradação ambiental. Assim, o monitoramento rigoroso do estado das munições emerge como uma etapa fundamental, não apenas para assegurar o funcionamento adequado e a segurança durante o armazenamento e manuseio, mas também para manter os riscos associados a esses processos em níveis aceitáveis.

Considerando a posição de destaque dos Estados Unidos (EUA) no contexto militar global e do impacto de suas práticas no estabelecimento de padrões internacionais nessa área, este estudo visa comparar os métodos de monitoramento de munições entre o Exército Brasileiro (EB) e o Exército dos Estados Unidos, com o intuito de identificar oportunidades para o aprimoramento das práticas adotadas pelo Brasil na gestão desse tipo de material. Para isso, esta pesquisa foca nas atividades-chave do monitoramento de munições – inspeções visuais, testes funcionais e exames laboratoriais – e emprega flexibilidade e economicidade como critérios para avaliar e comparar a eficácia dessas práticas em cada país.

Essa investigação justifica-se pela necessidade de otimizar as práticas de gestão de estoques militares, especialmente nos contextos em que fatores logísticos e ambientais específicos, como no Brasil, amplificam os desafios de conservação. Além disso, a presente pesquisa contribui significativamente para a literatura existente ao proporcionar um estudo comparativo inédito entre os sistemas de monitoramento de munições desses dois países. Assim, ao identificar lacunas e sugerir melhorias específicas, este estudo busca fomentar mudanças efetivas nas políticas nacionais de gestão de munições, contribuindo para um controle mais eficaz desses ativos.

Para atingir esses objetivos, foi empreendida uma análise comparativa documental de manuais técnicos e normativas militares. Esta metodologia permitiu avaliar de forma crítica as atividades básicas de monitoramento em uso pelo EB, destacando lacunas e potenciais áreas de aprimoramento.

O artigo inicia com uma revisão dos fundamentos relacionados à degradação de munições e do monitoramento da confiabilidade e segurança desses dispositivos. Segue-se uma análise de como são conduzidas as atividades de inspeção visual, provas funcionais e exames laboratoriais utilizados pelo EB, contrastando-os com as práticas adotadas pelos EUA. Com base nessa comparação, o estudo identifica lacunas e oportunidades de melhoria, culminando com recomendações específicas para aprimorar o sistema de monitoramento de munições no Brasil.

FUNDAMENTOS DA DEGRADAÇÃO DAS MUNIÇÕES

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), munição é o nome dado a qualquer dispositivo completo carregado com explosivos ou materiais nucleares, biológicos ou químicos, utilizado em atividades ofensivas, defensivas, de treinamento ou não-operacionais (UNITED NATIONS, 2021a). A abrangência desse conceito reflete diretamente a complexidade e a diversidade das munições que se fazem indispensáveis para o sucesso das operações militares contemporâneas. Além disso, a dinâmica intrínseca dos teatros de operações exige que toda munição necessária seja disponibilizada com a máxima brevidade. Isso, por sua vez, demanda a manutenção de um volume considerável de itens e componentes em estoque, até mesmo para as emergências que possam surgir em tempos de paz (U.S. WAR DEPARTMENT, 1944). Particularmente na ausência de conflitos, é comum que as munições permaneçam armazenadas por longos períodos, eventualmente chegando ao final de suas vidas úteis sem terem sido utilizadas. No Brasil, esse fenômeno é mais frequente com as munições para armamentos pesados, como canhões e obuseiros, produzidas no exterior, pois o ciclo de importação desses itens costuma ser mais longo e dispendioso, induzindo a compra de um volume maior de unidades e levando muitas delas a permanecerem por mais tempo em estoque. Não são incomuns ainda as situações em que sistemas de armas sejam considerados inservíveis, mas suas munições precisem ser armazenadas por períodos prolongados, até serem destinadas adequadamente (ALENCAR, 2014).

Mesmo sendo projetadas para suportar o uso severo em uma ampla faixa de condições ambientais, as munições estão continuamente sujeitas à degradação, inclusive durante o período de armazenamento. Os principais mecanismos através dos quais esses produtos se degradam derivam de alterações físicas causadas por variações de temperatura ou de alterações na composição química dos seus componentes, o que pode ocorrer tanto pela quebra ou formação de novas ligações químicas quanto pela migração de substâncias (WEI; LINDE; HEDENQVIST, 2019; DEFANTI; MENDONÇA-FILHO; NICHELE, 2020; TEIXEIRA *et al.*, 2023). Com alguma frequência, também é possível observar a ocorrência de degradação decorrente de causas puramente mecânicas, tais como a resultante de vibrações ou impactos excessivos sofridos durante o transporte ou manuseio desses materiais (UNITED NATIONS, 2021c).

A Tabela 1 abaixo resume as principais características dos processos de degradação que afetam as munições durante seu ciclo de vida.

Tabela 1 – Síntese dos mecanismos de degradação das munições

Degradação	Mecanismos	Exemplos
Química	Instabilidade química intrínseca de componente(s) da munição	Decomposição da NC
	Incompatibilidade química entre componentes da munição ou entre componentes e agentes externos	Corrosão provocada por umidade
		Degradação por ação da radiação UV
Física	Ação de forças intrínsecas	Migração/difusão de constituintes
	Ação da temperatura	Mudanças de propriedades mecânicas ou dimensionais
Mecânica	Ação de forças externas	Fadiga, sobrecarga, erosão

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de AOP-46 (2006).

EFEITOS DA MIGRAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS

As alterações de composição decorrentes da migração de substâncias costumam ocorrer com maior frequência em razão da presença de plastificantes nos componentes das munições. Adicionados aos polímeros para aperfeiçoar propriedades físicas ou mecânicas, as moléculas dessas substâncias geralmente não se ligam quimicamente à matriz polimérica, ficando assim livres para se moverem até regiões de menor concentração, em especial nas interfaces com outros materiais. Um exemplo típico desse efeito nas munições é a migração da nitroglicerina nas pólvoras de base dupla (BD) para os elementos inibidores de queima nos propelentes de foguetes, podendo resultar na diminuição da resistência mecânica e ao fogo desses componentes (BOBIC *et al.*, 2017).

Sabe-se ainda que a migração dos plastificantes que constituem as pólvoras pode torná-las mais frágeis, assim como aumentar sua velocidade de deflagração. Essa última consequência é perceptível principalmente nas munições de pequeno calibre, quando o plastificante utilizado na superfície das pólvoras como moderador de queima migra para o interior dos grãos, resultando no aumento da pressão na câmara do armamento, durante o disparo. Em acréscimo, a migração de plastificantes pode fazer com que outros componentes poliméricos das munições, como juntas, vedações e materiais de embalagens, percam flexibilidade, tornando-se mais vulneráveis a fraturas (NATO, 2006).

EFEITOS DA DEGRADAÇÃO QUÍMICA

As alterações de composição decorrentes da formação ou quebra de ligações ocorrem quando há reação química entre elementos com alguma incompatibilidade. Embora essa interação possa manifestar-se entre as partes constituintes da munição, isso é normalmente evitado na fase de projeto do produto, pela escolha apropriada dos materiais empregados em sua construção. Sendo assim, o mais frequente é essa incompatibilidade ocorrer entre as partes da munição e agentes externos. Dentre esses, o mais prejudicial é a umidade, especialmente ao penetrar o ambiente interno dos dispositivos, onde

pode interagir com os componentes eletrônicos, mecânicos ou explosivos presentes, aumentando o risco de reações indesejadas. A incidência de radiação solar direta, combinada à presença de oxigênio, também é um fator bastante importante para a degradação dos materiais, especialmente os polímeros (NATO, 2006).

O exemplo mais notório de degradação química nas munições convencionais, no entanto, é o que ocorre nas pólvoras contendo nitrocelulose (NC). Substância da família de ésteres do ácido nítrico, a NC foi um dos primeiros explosivos modernos e o primeiro polímero sintético a ser descoberto, na primeira metade do século XIX (URBANSKI, 1965). Responsável por fornecer energia e conferir integridade estrutural a diversas composições explosivas, ela ocupa ainda hoje o papel de principal componente das pólvoras utilizadas na maioria das munições – especialmente em razão de seu forte apelo econômico, dado ser produzida a partir da celulose, matéria-prima amplamente disponível na natureza.

Apesar dessas vantagens, a NC caracteriza-se também por apresentar ligações químicas de baixa energia de dissociação, e por isso facilmente sujeitas ao rompimento espontâneo, mesmo a baixas temperaturas. Em virtude das espécies altamente reativas e do calor gerados nesse processo, essa transformação pode ser rapidamente acompanhada por uma série de reações secundárias, também de natureza exotérmica. Como consequência disso, novas espécies reativas são produzidas, realimentando o processo de decomposição. A longo prazo, as consequências desse fenômeno podem ser das mais diversas, tais como: a quebra de cadeias poliméricas da NC, comprometendo propriedades mecânicas das pólvoras; a perda de poder calorífico, prejudicando o desempenho balístico das munições (DEFANTI; MENDONÇA-FILHO; NICHELE, 2020; TEIXEIRA *et al.*, 2023); e até mesmo a produção de substâncias tóxicas, em função da interação entre os radicais formados e os demais constituintes do propelente (RODRIGUES *et al.*, 2018).

No contexto da segurança das munições, o resultado mais expressivo do processo de decomposição da NC é a liberação de calor, particularmente pela sua natureza autossustentável, o que, sob determinadas circunstâncias, pode levar à ignição espontânea do material. O meio tradicionalmente empregado para evitar esse fenômeno em pólvoras à base de NC é a adição de estabilizantes, durante sua fabricação. Essas substâncias têm a propriedade de mitigar os efeitos dos radicais livres formados no início da degradação do material, interrompendo a propagação das reações subsequentes. O resultado desse processo é a extensão da vida útil do material, bem como o consumo do estabilizante inicialmente adicionado (BOHN, 2009; NATO, 2017c; TRACHE; TARCHOUN, 2019).

EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE OS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO

Em maior ou menor grau, todos os processos que resultam na alteração da composição química dos materiais são acelerados pelo aumento da temperatura. A temperatura é responsável ainda por acionar mecanismos específicos de degradação, como os que resultam da alteração em propriedades físicas dos componentes das munições, frequentemente comprometendo sua integridade estrutural. É o que ocorre, por exemplo, quando componentes com coeficientes de dilatação térmica distintos são unidos e posteriormente submetidos a variações acentuadas de temperatura. Nessas condições, a dilatação desigual dos materiais pode levar à sua separação ou descolamento, fenômeno também chamado delaminação (NATO, 2006).

As expansões ou contrações térmicas que resultam da dilatação ou da mudança de fase dos materiais também podem causar outros problemas nas munições, tais como fissuras nas cargas explosivas ou defeitos de vedação, permitindo a entrada de umidade ou o vazamento de material explosivo para fora de seu invólucro. Em componentes semicristalinos ou amorfos, como os polímeros, o abaixamento da temperatura além de certo ponto crítico pode ainda tornar esses materiais mais propenso a fraturas ou rupturas sob estresse, pela redução da sua capacidade de absorver energia (NATO, 2017c).

FUNDAMENTOS DO MONITORAMENTO DAS MUNIÇÕES

Em razão dos defeitos produzidos, a degradação das munições pode resultar no *comportamento inseguro* ou no *desempenho insatisfatório* desses dispositivos. Nas munições de projeção, os parâmetros de desempenho mais importantes costumam ser a velocidade do projétil na boca do armamento e a pressão máxima na câmara, embora a avaliação de outros critérios também possa ser necessária, dependendo do tipo de item. Na rotina operacional, a ocorrência de defeitos envolvendo essas variáveis pode ser observada através da respectiva falha, como por exemplo, quando uma granada de morteiro não atinge a distância prevista, ou quando a ejeção do estojo é prejudicada pelo excesso de pressão, após o disparo de uma munição encartuchada. Em todo caso, nesses e em outros exemplos, é necessário evitar que o usuário seja o primeiro a detectar o problema, tendo em vista que essas falhas podem resultar em acidentes de elevada gravidade, colocando em risco a segurança de equipamentos, instalações e pessoas ao redor. Desse modo, o monitoramento do estado das munições constitui etapa crucial para assegurar seu correto funcionamento, bem como para garantir que os riscos existentes durante seu armazenamento e manuseio permaneçam em níveis toleráveis, até o momento de seu emprego ou descarte. Em

acréscimo, a execução diligente desse processo também contribui para reduzir os custos associados à guarda dos estoques, favorecendo a priorização do emprego ou da manutenção das munições antes de elas se tornarem impróprias e colaborando para o planejamento de novas aquisições (U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY, 2017).

No âmbito das nações que integram a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), as diretrizes gerais para o monitoramento das munições em serviço são estabelecidas pela Publicação de Munição Aliada, ou AOP (*Allied Ordnance Publication*) nº 62 e documentos correlatos (NATO, 2017a). Paralelamente, a ONU dispõe das Diretrizes Técnicas Internacionais de Munições, ou IATG (*International Ammunition Technical Guidelines*), que constitui um referencial de adesão voluntária, destinado aos países que queiram aperfeiçoar seus sistemas de monitoramento desses ativos (UNITED NATIONS, 2021b). A menos que expressamente indicado de outra forma, as definições fornecidas a seguir derivam dessas duas diretivas, as quais representam referências fundamentais para a padronização e o desenvolvimento de práticas eficazes de gestão e controle de munições na atualidade.

Segundo esses referenciais, o processo de monitoramento de munições é constituído por um conjunto de atividades, dentro do qual se inserem as inspeções visuais, as provas de funcionamento e os ensaios laboratoriais das munições ou de seus componentes. A utilização de códigos de condição para classificação das munições é parte essencial desse processo, uma vez que permite identificar rapidamente aquelas que estão prontas para uso, requerem reparos ou precisam de correções antes da serem distribuídas ou empregadas (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Esquema simplificado de codificação das munições, de acordo com seu estado

Código de Condição	Estado da Munição
A	Em condições de emprego
B	Proibida para uso (aguardando investigação técnica)
C	Indisponíveis para uso (aguardando inspeção técnica, reparo, modificação ou teste)
D	Para descarte

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Inventory Management (2021).

Os sistemas de monitoramento também incluem elementos de suporte externo à sua execução, como os relatórios de funcionamento em campo e os relatórios de acidentes e defeitos, os quais fornecem subsídios complementares para a detecção de padrões e tendências de degradação das munições em serviço (NATO, 2017a).

AS INSPEÇÕES VISUAIS

As inspeções visuais constituem uma prática fundamentada na observação detalhada do estado geral das munições, sendo normalmente conduzidas por pessoal familiarizado com o projeto e o modo

de operação de cada dispositivo. Essa atividade objetiva detectar as manifestações visíveis de degradação, bem como identificar danos físicos ou ausência de componentes que possam ter sido causados por manuseio impróprio ou falhas de fabricação (UNITED NATIONS, 2021c).

A frequência das inspeções realizadas periodicamente varia conforme a taxa de deterioração esperada para cada tipo de item, sendo normalmente maior para os itens considerados mais estáveis. Além disso, inspeções pontuais (não-periódicas), podem ser desencadeadas por eventos específicos, tais como quando uma munição sofre algum impacto durante o transporte ou quando existe suspeita de que determinado item tenha provocado alguma falha em exercício. No caso das inspeções periódicas, as amostras são selecionadas aleatoriamente no conjunto de munições considerado. Nos demais casos, a amostragem tende a ser mais rigorosa, podendo abranger até 100% dos itens. Durante as inspeções, listas de verificação fornecem indicadores claros para a detecção e classificação dos defeitos, bem como para a categorização da munição inspecionada, com base no número e tipo de defeitos encontrados (ver Tabela 3). Devido à sua importância crítica para a proteção das munições, os materiais de embalagem também devem passar por uma análise rigorosa de sua condição (NATO, 2006; UNITED NATIONS, 2021c).

Tabela 3 – Classificação dos defeitos

Defeito	Descrição	Exemplos
Críticos	Afetam a segurança no armazenamento, manuseio, transporte ou uso da munição.	Vazamento da carga explosiva para fora do seu invólucro; ausência de dispositivo de segurança; aletas danificadas em projéteis com empenagem; munição alto-explosiva (AE) com marcação de munição inerte.
Graves	Defeitos que impactam significativamente o desempenho da munição, exigindo ações corretivas.	Corrosão severa de componentes; estojo de cartucho amassado; munição anti-carro (AC) com marcação de munição AE.
Menores	Defeitos que não afetam a segurança ou desempenho da munição, mas exigem correção prévia à distribuição.	Embalagem selada inadequadamente; marcação incorreta do número de lote.
Insignificantes	Defeitos que não impactam na segurança nem no desempenho da munição, mas que podem evoluir se não forem corrigidos.	Corrosão de nível leve em componentes metálicos.

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Inspection of Ammunition (2021b).

AS PROVAS DE FUNCIONAMENTO

As provas de funcionamento são conduzidas para avaliar o comportamento operacional das munições e geralmente ocorrem em ambientes controlados, como campos de tiro e laboratórios especializados. As características próprias de cada teste, incluindo critérios de amostragem, medição e aprovação, variam de acordo com o tipo de item. O teste funcional das munições comuns, por exemplo, é normalmente realizado através de ensaio balístico ou de fogo real, utilizando especificações do fabricante ou dados equivalentes, a fim de avaliar a confiabilidade e o desempenho desses dispositivos.

Munições de alta complexidade, por sua vez, são geralmente submetidas apenas a testes não-destrutivos, tendo em vista seu elevado custo (NATO, 2017a). No caso particular desses itens, o levantamento de informações durante o disparo em treinamento adquirem grande importância para avaliar o estado dos itens remanescentes em estoque (U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY, 2016a; UNITED NATIONS, 2019). Assim como as inspeções, as provas de funcionamento podem ser realizadas de forma periódica ou em resposta a situações específicas, inclusive como consequência de resultados insatisfatórios obtidos em campo ou de análises realizadas anteriormente em itens do mesmo lote (UNITED NATIONS, 2021b).

EXAMES LABORATORIAIS

Os exames laboratoriais das munições destinam-se a avaliar a degradação de parâmetros críticos que não são facilmente mensuráveis por inspeções visuais ou provas de funcionamento, como propriedades químicas, mecânicas e explosivas de seus componentes. Os resultados assim obtidos podem ser empregados tanto para determinar se os materiais testados permanecem em condições adequadas quanto para prever sua vida útil remanescente, constituindo elementos de suma importância para a gestão desses ativos (NATO, 2017a).

Devido às consequências potencialmente catastróficas da instabilidade química para os materiais energéticos contidos nas munições, grande parte dos esforços laboratoriais é dedicado ao monitoramento da condição desses componentes, particularmente das pólvoras contendo NC, em razão de sua natureza intrinsecamente instável (NATO, 2008). Os principais ensaios realizados com a finalidade de avaliar essas pólvoras baseiam-se na quantificação de parâmetros relacionados à sua degradação química (ver Figura 1), como o consumo de estabilizantes, a produção de calor e a liberação de gases (BOHN, 1994; TRACHE; TARCHOUN, 2019). Como as reações que dão causa a tais fenômenos costumam ocorrer de forma muito lenta em situações normais, as amostras são geralmente envelhecidas artificialmente durante os ensaios, o que reduz o tempo necessário para tornar mensuráveis os efeitos da degradação (VOGELSANGER, 2004).

A partir do tipo de informação obtida, os testes podem ser classificados em básicos ou preditivos. Os testes básicos tomam como referência apenas o valor presente do fator considerado – por exemplo, a quantidade de gases produzidos ou o tempo decorrido até a liberação de um determinado volume gasoso, durante o aquecimento da amostra de pólvora. Em resposta, esse valor permite descrever somente o estado atual do item (“estável” ou “não-estável”), conforme o resultado esteja dentro ou fora dos limites pré-estabelecidos. Incluem-se nessa categoria os testes ditos tradicionais, como o de

Bergmann-Junk e o de metil violeta. Já os testes preditivos permitem correlacionar a variação do fator considerado com o regime de envelhecimento empregado, sendo essa informação utilizada para estimar valores futuros desse mesmo fator – e, portanto, da estabilidade química do material –, em diferentes temperaturas (NATO, 2017b).

Figura 1 – Esquema simplificado do envelhecimento de pólvoras à base de NC



Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Vogelsanger (2004).

Mesmo com suas limitações, os testes básicos ainda compõem uma parte significativa dos programas de vigilância ao redor do mundo, na maioria devido à vasta experiência adquirida com esse tipo de ensaio pelos países que optaram por eles, mas também por restrições de ordem técnica e financeira. Apesar disso, os ensaios preditivos, mais modernos e confiáveis, vem ganhando cada vez mais espaço, secundando ou até substituindo os testes básicos dentro desses mesmos programas (DRUET; ASSELIN, 1988).

METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, focada na análise documental de manuais técnicos e normativas militares, com a finalidade de contrapor as práticas de monitoramento de munições adotadas pelo Exército Brasileiro (EB) e pelo Exército dos Estados Unidos (EUA), utilizando os critérios de flexibilidade e economicidade como parâmetros principais de comparação. A escolha desse método justifica-se pela natureza do tema investigado, que, devido à sua relevância estratégica e implicações para apara a segurança nacional, apresenta um corpo limitado de literatura acadêmica disponível para consulta.

A escassez de referências acadêmicas sobre o monitoramento de munições pode ser atribuída, em parte, à natureza altamente especializada e sensível das informações envolvidas. Muitos dos procedimentos, técnicas e políticas relacionados à gestão e ao monitoramento de munições são considerados informações reservadas, restritas ao uso interno dos respectivos exércitos ou órgãos de defesa. Essa característica do campo de estudo impõe limitações à disponibilidade de publicações acadêmicas tradicionais, tais como artigos de periódicos e conferências, que normalmente alimentam o debate científico em outras áreas do conhecimento.

Consequentemente, documentos normativos e técnicos produzidos pelos Exércitos dos EUA e do Brasil, bem como por órgãos multinacionais reconhecidos, como a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) e as Nações Unidas (ONU), constituem as fontes primárias mais valiosas e confiáveis de informação sobre o assunto, particularmente pela experiência desses últimos em promover a cooperação em defesa, com vistas à melhoria da eficácia operacional e segurança das nações (SILVA, 2024; FAGUNDES, 2019). A utilização dessas fontes normativas e técnicas, portanto, reflete uma abordagem pragmática necessária para investigar um tema de grande importância estratégica, sem diminuir a relevância acadêmica do presente estudo.

RESULTADOS

Sistema de monitoramento de munições adotado pelo EB

No contexto brasileiro, o sistema de vigilância de munições do Exército é conduzido, em sua maior parte, segundo os procedimentos descritos no Manual Técnico T 9-1903 – Armazenamento, Conservação, Transporte e Destruição de Munições, Explosivos e Artifícios. Publicado originalmente em 1970 e atualizado pela última vez no ano de 1981, o T9 estrutura as atividades de vigilância em torno da realização de provas e exames das munições, para determinar seu estado de conservação e retirá-las de uso antes que possam oferecer algum perigo. As inspeções visuais, chamadas ali de provas de observação, são realizadas a critério dos encarregados pelos paióis e armazéns, tendo uma periodicidade predefinida apenas para projetis de artilharia, petardos e granadas de mão carregados com TNT. O estado dos materiais energéticos contidos nas munições é priorizado pela norma, que, no entanto, não estabelece uma classificação prévia de criticidade para os possíveis defeitos que podem aparecer nas inspeções. Desse modo, qualquer anormalidade observada durante o desempenho dessas atividades conduz obrigatoriamente à realização de exames laboratoriais de todos os materiais energéticos contidos na munição considerada (EXÉRCITO BRASILEIRO, 1981).

Os exames laboratoriais também são realizados periodicamente, de acordo com uma programação específica para cada classe de item. A norma prevê o primeiro exame das munições contendo pólvoras químicas de base simples (BS) após cinco anos da fabricação, seguido de avaliações subsequentes a cada dois anos. Já as munições contendo pólvoras BD têm seu exame inicial realizado um ano após sua data de fabricação, o segundo exame realizado cinco anos após o primeiro, e os seguintes, realizados anualmente. O procedimento adotado na prática atual, no entanto, é o de iniciar a realização dos exames apenas após a expiração do prazo de validade atribuído pelo fabricante, repetindo o exame anualmente para munições contendo pólvoras BD e a cada dois anos para BS (EXÉRCITO BRASILEIRO, 1981).

Seja em regime eventual ou periódico, a estabilidade das pólvoras mecânicas e dos altos explosivos é avaliada por meio de ensaios de estabilidade química à vácuo, enquanto as pólvoras à base de NC são examinadas através da prova alemã e dos ensaios de Bergmann-Junk e de armazenamento a 100 ^{0}C. Nesse último caso, a combinação dos resultados obtidos em cada um dos três ensaios permite classificar a estabilidade do material em boa, regular ou má. Os testes funcionais são planejados em função do resultado da estabilidade química da pólvora e do tempo de fabricação da munição, conforme Tabela 4, que também ilustra as categorias em que a munição é classificada, de acordo com o conjunto de resultados obtidos (EXÉRCITO BRASILEIRO, 1981).

Tabela 4 – Classificação de pólvoras, segundo manual técnico do EB

Estabilidade Química	Prova Balística	Tempo de Fabricação	Categoria	Emprego
Boa	Desnecessária	< 10 anos	A	Ordinário
		10 a 15 anos	B	
	Satisfatória	> 15 anos	C	Preferencial
Regular		Qualquer		
Boa	Não Satisfatória		D	Imprestável para fins militares
Regular				
Má	Desnecessária		E	Proibido

Fonte: Manual T9-1903 (1981).

Embora não previsto pelo T9, os ensaios de estabilidade química das pólvoras também podem ser realizados através da técnica de Calorimetria de Fluxo de Calor (CFC), segundo metodologia descrita na Norma Técnica do Exército Brasileiro NEB-T M-255, de 2007. Os resultados obtidos permitem determinar a estabilidade das pólvoras, os prazos de reanálise e a necessidade de testes funcionais, de forma similar ao previsto pelo T9. O ensaio é realizado em um calorímetro de alta precisão, capaz de medir a energia liberada pela amostra de pólvora durante um ciclo de envelhecimento forçado, realizado à temperatura de 85 ^{0}C, durante 168 h. O intervalo de tempo para reavaliar uma determinada pólvora não se baseia apenas na magnitude do pico exotérmico observado, mas também no instante em que esse pico ocorreu, em comparação com o valor registrado no último teste da mesma

pólvora. Assim, o prazo previsto para o exame seguinte é definido com base na diferença entre esses dois valores. Ao final, os prazos obtidos ainda devem ser corrigidos por um fator que depende da região onde a munição é armazenada. Dessa forma, uma munição cujo prazo para reavaliação fornecido pelo CFC tenha sido de 08 anos deverá ser examinada novamente em 4,4 e 10,4 anos se estiver armazenada no município de Paracambi-RJ (fator 0,55) ou de Juiz de Fora-MG (fator 1,30), respectivamente (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2007).

O sistema de monitoramento de munições adotado pelos EUA

Nos EUA, o gerenciamento das munições de todas as forças armadas é centralizado pelo Exército, através do Programa de Confiabilidade de Estoques de Munições, ou ASRP (*Ammunition Stockpile Reliability Program*). O ASRP tem como pilares um conjunto de programas específicos para realização de inspeções, testes laboratoriais e provas de funcionamento das munições e seus componentes, sendo apoiado por atividades de pesquisa, desenvolvimento, teste e avaliação desses itens. Um dos traços distintivos do ASRP é a existência de um programa específico destinado ao monitoramento da estabilidade dos propelentes, chamado Programa de Estabilidade dos Propelentes, ou PSP (*Propellant Stability Program*). O PSP engloba dois componentes fundamentais: o Programa Mestre de Propelentes (*Master Propellant Program*) e o Programa de Propelentes em Estoque (*Stockpile Propellant Program*) (U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY, 2016b).

Segundo o Programa Mestre de Propelentes, amostras de novos lotes de propelentes adquiridos pelo governo dos EUA devem ser enviadas ao Laboratório de Vigilância de Propelentes do Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia de Armamentos do Exército (ARDEC) até seis meses após sua aceitação. Essas amostras mestras são então submetidas a análises periódicas para determinar seus percentuais de estabilizante efetivo, o que permite não apenas sentenciar seu nível de estabilidade atual, conforme informações contidas na Tabela 5, mas também estimar o prazo para reavaliação desse parâmetro, através do teste de Previsão do Intervalo Seguro, ou SIP (*Safe Interval Prediction*).

Tabela 5 – Códigos de categoria de estabilidade das pólvoras

Categoria de estabilidade	Percentual de estabilizante efetivo	Sentença
A	≥ 0.30	Aceitável
C	0.29 – 0.20	Com restrições
D	≤ 0.20	Inaceitável

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Ammunition surveillance procedures (2016b).

No SIP, o percentual de estabilizante remanescente da pólvora é medido ao longo de um ciclo de envelhecimento artificial, utilizando temperatura constante de 65.5 ºC e duração variável, de acordo com o tipo de propelente. Baseado no conhecimento da cinética de depleção do estabilizante, esse teste permite estimar o intervalo para armazenamento seguro da pólvora até o seu próximo teste, limitado ao prazo máximo de 15 anos (U.S. ARMY DEFENSE AMMUNITION CENTER, 1998). O resultado obtido desse modo orienta a gestão do respectivo lote em todas as unidades das forças armadas, até o consumo completo desses estoques. A classificação de uma amostra mestra na categoria de estabilidade "D", por exemplo, resulta na reclassificação de todo o lote, cuja desmilitarização deverá ocorrer em até 60 dias. A identificação de eventuais discrepâncias provocadas pelas condições específicas de armazenamento das pólvoras em campo, nos demais casos, é realizada através do Programa de Propelentes em Estoque, o qual se destina a analisar a estabilidade de amostras armazenadas em diversas localidades, a fim de comparar esses resultados com aqueles fornecidos pelas respectivas amostras mestras (U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY, 2016b).

Um aspecto relevante do PSP é que participam dele *apenas as pólvoras estocadas a granel* ou, quando integradas às munições, *apenas nos casos em que o calibre seja maior do que 5", ou 127mm*. Isso porque, segundo a própria norma que estabelece os parâmetros gerais do ASRP, não há registro de acidentes provocados por autoignição de pólvoras nas demais configurações. Dessa forma, salvo por determinação explícita em contrário, a reprovação de uma amostra mestra não implica em nenhuma restrição de uso às munições que contenham pólvora do mesmo lote, desde que seu calibre seja inferior a 127mm. Além disso, as pólvoras nessa configuração não são submetidas a exames laboratoriais periódicos (U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY, 2016b).

No PSP, a quantificação do percentual de estabilizante é realizada principalmente através da técnica de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE). Além disso, o programa também dispõe de kits móveis baseados nas técnicas de Cromatografia de Camada Delgada (CCD) e de Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR – *Near-Infrared*) para realização de ensaios em campo, o que contribui de maneira efetiva para triagem rápida das pólvoras que requerem maiores cuidados devido à falta de estabilidade (GRAVES, 2008).

Outra peculiaridade do ASRP diz respeito à realização dos testes funcionais, pois os parâmetros de desempenho aceitáveis são ligeiramente mais flexíveis do que os exigidos nos ensaios de aceitação do lote. Isso permite validar a utilização não apenas das munições cujas performances sejam essencialmente equivalentes à intenção do projeto, mas também daquelas cujo desempenho possa ser considerado satisfatório em outros contextos, como em atividades de treinamento, prevenindo a perda total desses ativos. A gestão dessas características é realizada através de códigos funcionais, os quais são

utilizados para classificar a condição operacional das munições após os testes de funcionamento, realizados normalmente em ciclos de 5 anos. As inspeções visuais, por sua vez, não se diferenciam de forma substancial das diretrizes emanadas pelos órgãos de referência citados previamente neste trabalho, não merecendo aqui nenhum destaque (U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY, 2016b).

DISCUSSÃO

A comparação entre os sistemas de monitoramento de munições do Brasil e dos EUA revela duas abordagens distintas em termos de flexibilidade operacional e economicidade. Nos EUA, a tolerância em relação à perda de eficiência das munições nos testes funcionais permite que dispositivos que não atendam mais aos critérios de aceitação de lote possam ser empregadas em treinamentos ou situações emergenciais, otimizando o aproveitamento dos recursos disponíveis e reduzindo as despesas com o descarte desses itens.

A mesma característica fica evidenciada na gestão das munições de calibre inferior a 127mm e que contenham pólvoras instáveis: nessa condição, nenhuma munição é automaticamente descartada, devido ao risco inexistente de autoignição, segundo as diretivas americanas. A exclusão de munições de diâmetro inferior a 127mm do programa específico de monitoramento de estabilidade das pólvoras também evita o consumo desnecessário de itens funcionais, bem como as demais despesas associadas à realização dos ensaios. Mesmo para as munições incluídas no referido programa, a utilização do sistema de amostras mestras permite a tomada de decisão a respeito da estabilidade de suas pólvoras sem a obrigatoriedade de desmontagem desses dispositivos.

A avaliação do estabilizante efetivo das pólvoras através da CLAE é outro ponto de avanço significativo do sistema americano, dada a natureza preditiva do SIP. É de se destacar ainda que o SIP se assenta sob as mesmas bases cinéticas que o método de CFC, já adotado pelo EB, porém, podendo fornecer prazos para armazenamento seguro das pólvoras até 50% superiores (15 anos) em comparação com o CFC, que atinge no máximo 10 anos, dependendo da região de armazenamento do material.

Em acréscimo, considerando a extensão territorial do Brasil e a dispersão de suas instalações militares, a disponibilidade de um sistema de ensaio móvel minimizaria as despesas de transporte de amostras e reduziria os riscos de alteração das condições de estabilidade das pólvoras, devido a exposições ambientais adversas, durante o trajeto. Tal avanço contribuiria significativamente para a eficiência no monitoramento da estabilidade das pólvoras, aprimorando a tomada de decisão a respeito dos estoques de munições.

CONCLUSÃO

O monitoramento eficaz das munições é de vital importância para as forças armadas de qualquer nação, afetando diretamente a segurança nacional. Nesse sentido, a compreensão de como as munições se degradam e a absorção da experiência de outras nações a esse respeito são fundamentais para aprimorar as práticas de monitoramento adotadas por qualquer país.

A análise comparativa com o sistema americano revelou oportunidades significativas de melhoria das práticas adotadas pelo EB, em particular pela ênfase na análise de estabilidade das pólvoras através do método de depleção de estabilizantes, com emprego subsidiário de um sistema móvel de análise, e pela adoção de um sistema de avaliação de amostras mestras. Entretanto, é imprescindível reconhecer as nuances específicas do Brasil, incluindo suas condições ambientais e orçamentárias, ao adaptar as melhores práticas identificadas em outros países. Essa contextualização é essencial para garantir a eficácia das estratégias de monitoramento e o uso eficiente dos recursos disponíveis.

Por fim, à guisa de conclusão, ressalta-se a necessidade de aperfeiçoamento das demais ferramentas empregadas no sistema brasileiro de monitoramento nacional, especialmente as diretivas que o regem, com o objetivo de garantir sua relevância e eficácia diante dos avanços tecnológicos no cenário global.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, T. M. **A gestão de suprimento classe V (Munição) no Exército Brasileiro adequada ao tempo de paz** (Tese de Doutorado em Ciências Militares). Rio de Janeiro: ECEME, 2014.

BOBIC, N. *et al*. "The influence of migration processes in gunpowder charge on the quality of mortar ammunition". **Hemijska Industrija**, vol. 71, n. 3, 2017.

BOHN, M. A. "Prediction of In-Service Time Period of Three Differently Stabilized Single Base Propellants". **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, vol. 34, n. 3, 2009.

BOHN, M. A. "Prediction of Life Times of Propellants - improved kinetic description of the stabilizer consumption". **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, vol. 19, n. 5, 1994.

DEFANTI, B. F. S.; MENDONÇA-FILHO, L. G.; NICHELE, J. "Effect of ageing on the combustion of single base propellants". **Combustion and Flame**, vol. 221, 2020.

DRUET, L.; ASSELIN, M. "A review of stability test methods for gun and mortar propellants, II: Stability testing and surveillance". **Journal of Energetic Materials**, vol. 6, 1988.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Manual T9-1903**: Armazenamento, manutenção, transporte, provas e exames e destruição de munições, explosivos e artifícios. Brasília: Exercíto Brasileiro, 1981.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **NEB/T M-255**: Propelente a base de nitrocelulose determinação de estabilidade química por microcalorimetria. Brasília: Exercíto Brasileiro, 2007.

FAGUNDES, F. C. R. **Políticas de Segurança e Defesa nas Fronteiras Internacionais do Brasil**. Boa Vista: Editora da UFRR, 2019.

GRAVES, E. M. "Field-Portable Propellant Stability Test Equipment". **Army Logistician**, vol. 40, n. 4, 2008.

NATO - North Atlantic Treaty Organization. **AOP-46**: The scientific basis for the whole life assessment of munitions. Brussels: NATO Standardization Agency, 2006.

NATO - North Atlantic Treaty Organization. **AOP-48**: Explosives, nitrocellulose-based propellants, stability test procedures and requirements using stabilizer depletion. Brussels: NATO Standardization Agency, 2008.

NATO - North Atlantic Treaty Organization. **AOP-62**: In-service surveillance of munitions general guidance. Brussels: NATO Standardization Office, 2017a.

NATO - North Atlantic Treaty Organization. **AOP-63:** In-service surveillance of munitions sampling and test procedures. Brussels: NATO Standardization Office, 2017b.

NATO - North Atlantic Treaty Organization. **AOP-64**: In-service surveillance of munitions condition monitoring of energetic materials. Brussels: NATO Standardization Office, 2017c.

SILVA, E. A. C. **Geopolítica da Segurança Internacional**: A Ótica das Organizações de Cooperação em Defesa. Boa Vista: Editora IOLEs, 2024.

TEIXEIRA, F. P. *et al*. "Effect of relative humidity and absorbed water on the ethyl centralite consumption in nitrocellulose-based propellants". **Cellulose**, vol. 30, n. 3, 2023.

TRACHE, D.; TARCHOUN, A. F. "Analytical Methods for Stability Assessment of Nitrate Esters-Based Propellants". **Critical reviews in analytical chemistry**, vol. 49, n. 5, 2019.

U.S. ARMY DEFENSE AMMUNITION CENTER. **Propellant management guide**. Rock Island: Defense Ammunition Center, 1998.

U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY. **Ammunition Stockpile Reliability Program**. Washington: Department of the Army, 2016a.

U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY. **Ammunition surveillance procedures**. Washington: Department of the Army, 2016b.

U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY. **The Army Ammunition Management System**. Washington: Department of the Army, 2017.

U.S. WAR DEPARTMENT. **TM 9-1904 - Ammunition Inspection Guide**. Washington: War Department, 1944.

UNITED NATIONS. **Critical Path Guide to the International Ammunition technical Guidelines**, 2019.

UNITED NATIONS. **Glossary of terms, definitions and abbreviations**. New York: Unted Nations, 2021a.

UNITED NATIONS. **Inspection of ammunition**. New York: Unted Nations, 2021b.

UNITED NATIONS. **Inventory management**. New York: Unted Nations, 2021.

UNITED NATIONS. **Surveillance and in-service proof**. New York: Unted Nations, 2021c.

URBANSKI, T. **Chemistry and Technology of Explosives**. Oxford: Pergamon Press, 1965.

VOGELSANGER, B. "Chemical Stability, Compatibility and Shelf Life of Explosives". **CHIMIA International Journal for Chemistry**, vol. 58, n. 6, 2004.

WEI, X. F.; LINDE, E.; HEDENQVIST, M. S. "Plasticiser loss from plastic or rubber products through diffusion and evaporation". **NPJ Materials Degradation**, vol. 3, n. 1, 2019.



BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)

Ano VI | Volume 17 | Nº 51 | Boa Vista |2024

http://www.ioles.com.br/boca

Editor chefe:

Elói Martins Senhoras

Conselho Editorial

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

Conselho Científico

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima