

INTERFERENTES NA ANÁLISE QUÍMICA DE RESÍDUOS PÓS-EXPLOÇÃO

Lúcio Paulo Lima Logrado *

Instituto Nacional de Criminalística, Polícia Federal, Brasília, DF, Brasil

INTERFERENCES IN THE CHEMICAL ANALYSIS OF POST-BLAST RESIDUES

RESUMO

A análise de resíduos pós-explosão é essencial em investigações forenses, sendo os interferentes um dos principais desafios analíticos. Neste trabalho, discutimos três fontes de interferência: (i) materiais de coleta e preparo de amostras, que podem introduzir íons indesejados e contaminantes orgânicos; (ii) cédulas, que também apresentam íons-alvo e são comumente analisadas em casos de explosões em caixas eletrônicos; e (iii) materiais carbonáceos, comuns neste contexto, que podem reter analitos de interesse e dificultar sua detecção. Esta revisão representa um compilado dos principais interferentes com base em estudos realizados por CG-EM e CI-DC em análises de resíduos pós-explosão, inspirados em dificuldades enfrentadas em casos reais analisados no Instituto Nacional de Criminalística da Polícia Federal do Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Explosivos. Interferentes. Cromatografia Gasosa-Espectrometria de Massas (CG-EM). Cromatografia Iônica (CI).

ABSTRACT

Post-blast residue analysis is essential in forensic investigations of crimes involving the use of explosives, with interferences being one of the main analytical challenges. In this work, we discuss three sources of interference: (i) sample collection and preparation materials, which can introduce unwanted ions and organic contaminants; (ii) banknotes, which also contain ions that can interfere with the analysis of target analytes and are commonly analyzed in ATM explosion cases; and (iii) carbonaceous materials, common in this context, which can retain analytes of interest and hinder their detection. This review presents a concise overview of the main interferences based on studies using GC-MS and IC-CD in post-blast residue analysis, inspired by challenges encountered in real forensic cases investigated at the National Institute of Criminalistics of the Brazilian Federal Police.

KEYWORDS: Explosives. Interferents. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Ion Chromatography (IC).

* lucio.lpl@pf.gov.br

INTRODUÇÃO

Explosivos são utilizados legalmente no Brasil e no mundo em diversas atividades, incluindo operações militares, policiais, mineração, prospecção de petróleo, demolições e explosões controladas, construção de rodovias ou ferrovias, fogos de artifício, uso industrial (setores aeronáutico e automotivo), soldagem, entre outros. Por outro lado, o uso ilegal de explosivos no Brasil também é uma realidade, sendo empregados em atos de terrorismo, extorsão, vandalismo, pesca predatória, arrombamentos e roubos¹.

Os explosivos podem ser classificados de várias formas, incluindo composição química, velocidade de reação, sensibilidade e uso pretendido. No contexto das análises químicas, uma classificação chave baseada na natureza química divide os explosivos em dois grandes grupos: i) compostos explosivos individuais, tipicamente substâncias orgânicas, como nitroaromáticos, nitraminas, nitroésteres, nitroalifáticos e peróxidos; e ii) misturas explosivas combustível-oxidante que consistem em combustíveis como enxofre, carbono, metais em pó (e.g. Al, Mg), óleos combustíveis, vaselina e açúcares, combinados com sais inorgânicos, como nitratos, cloratos e percloratos, que atuam como agentes oxidantes. Em alguns países, como o Brasil, uma parte significativa dos crimes envolvendo explosivos está relacionada a esta última categoria, sendo dispositivos explosivos improvisados (IEDs) comumente baseados em misturas combustível-oxidante, incluindo pólvora negra, emulsões explosivas e misturas contendo sais de clorato e/ou perclorato².

A química forense desempenha um papel significativo na investigação de crimes envolvendo explosivos, entre outras áreas da ciência forense. A determinação da composição química dos componentes explosivos é de extrema importância, uma vez que impacta diversos aspectos da persecução penal. Essa análise auxilia na diferenciação entre crimes e acidentes, estabelece conexões entre cenas de crime, objetos e suspeitos, além de fornecer informações valiosas sobre os tipos de explosivos mais utilizados em ações criminosas em uma determinada região ao longo do tempo³.

A análise de explosivos intactos (pré-explosão) ou de partículas remanescentes não reagidas após uma explosão geralmente é menos complexa em termos de quantidade de amostra, permitindo a aplicação de diversas técnicas analíticas para identificar os componentes dos explosivos², como Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)⁴⁻⁸, Espectroscopia Raman⁹⁻¹⁸, Cromatografia Iônica (CI)^{3,19-26}, Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM)^{3,7,27-29}, Difração de Raios X (DRX)³⁰⁻³³, Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (MEV-EDS)^{8,34} e Espectroscopia de Emissão por Plasma Induzido por Laser (LIBS)^{35,36}.

Em contraste, a análise de resíduos pós-explosão apresenta desafios significativos, uma vez que, em geral, explosivos

intactos não estão presentes em quantidades visíveis, limitando as opções analíticas a, principalmente, técnicas cromatográficas e/ou eletroforéticas. Nesses casos, as principais dificuldades incluem quantidade limitada de amostra e baixas concentrações dos compostos de interesse, aumentando, consequentemente, a necessidade de técnicas analíticas altamente sensíveis, bem como a preocupação com a presença de diversos interferentes^{1,25,37-39}. Esses interferentes podem ser originados de diferentes fontes, incluindo materiais utilizados para coleta e preparo de amostras, matrizes diversas, como, por exemplo, cédulas (comumente encontradas em locais de explosões de caixas eletrônicos no Brasil) e substâncias carbonáceas, comum em materiais coletados em local de explosão. A presença de íons, compostos orgânicos e contaminantes diversos provenientes desses materiais pode resultar em falsos positivos ou negativos, dificultando a identificação precisa dos resíduos explosivos.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo compilar achados sobre potenciais fontes de interferência, bem como as medidas propostas para minimizá-las, baseando-se em estudos prévios, garantindo a confiabilidade dos resultados analíticos. Esta revisão sintetiza, em um único artigo, as dificuldades observadas ao longo de vários anos de análises de explosivos e resíduos pós-explosão, bem como de casos provenientes de diferentes estados do Brasil, oferecendo uma referência prática para peritos criminais que atuam em cenas de crime envolvendo explosivos e na análise química de seus resíduos.

METODOLOGIA

O presente estudo consiste em um conjunto de dados obtidos por meio da compilação crítica de estudos conduzidos pelo Instituto Nacional de Criminalística (INC), incluindo algumas parcerias com a Universidade de Brasília (UnB), e complementado pela análise de casos representativos de resíduos pós-explosão no contexto brasileiro. Quanto aos tipos de interferentes abordados, foram considerados estudos publicados entre os anos de 2019 e 2025, especialmente relacionados a explosivos comumente empregados em ações criminosas no Brasil¹. Os critérios de seleção dos dados incluíram artigos que abordassem técnicas instrumentais comumente utilizadas neste tipo de análise, como a Cromatografia Iônica com Detecção por Condutividade (CI-DC) e a Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM), cujas descrições detalhadas podem ser consultadas nos estudos originais referenciados.

INTERFERENTES NA ANÁLISE DE EXPLOSIVOS E RESÍDUOS PÓS-EXPLOSÃO

A preocupação com a presença de interferentes torna-se especialmente relevante em situações nas quais há escassez ou ausência de partículas visíveis de explosivos — condição frequentemente observada nas análises de resíduos pós-explosão

e na busca por traços de explosivos em análises comparativas destinadas a estabelecer associações entre indivíduos, objetos ou locais. Nesses contextos, a reduzida quantidade de material disponível e a elevada complexidade das matrizes aumentam o risco de interferências que podem comprometer a interpretação analítica^{1,25,37-39}. Por outro lado, nas análises de explosivos intactos (pré-explosão) ou de partículas residuais não reagidas, o impacto de interferentes tende a ser reduzido, uma vez que a maior disponibilidade e homogeneidade das amostras favorecem a detecção e a caracterização precisa dos constituintes por meio de diferentes técnicas instrumentais. Visando ilustrar um exem-

plo comum deste tipo de caso, a Figura 1 apresenta resultados típicos obtidos para emulsões explosivas quando há material suficiente para análises por FTIR (inferior) e Raman (superior), nos quais se buscam componentes originais do explosivo. Na análise por FTIR, as bandas mais características correspondem ao NH_4NO_3 em 3232 cm^{-1} , 3066 cm^{-1} , 1753 cm^{-1} , 1405 cm^{-1} , 1308 cm^{-1} , 1041 cm^{-1} , 826 cm^{-1} e 714 cm^{-1} , além de hidrocarbonetos em 2917 cm^{-1} e 2848 cm^{-1} . Já o espectro Raman evidencia, predominantemente, duas bandas características do NH_4NO_3 , localizadas em 1044 cm^{-1} e 712 cm^{-1} ³⁹.

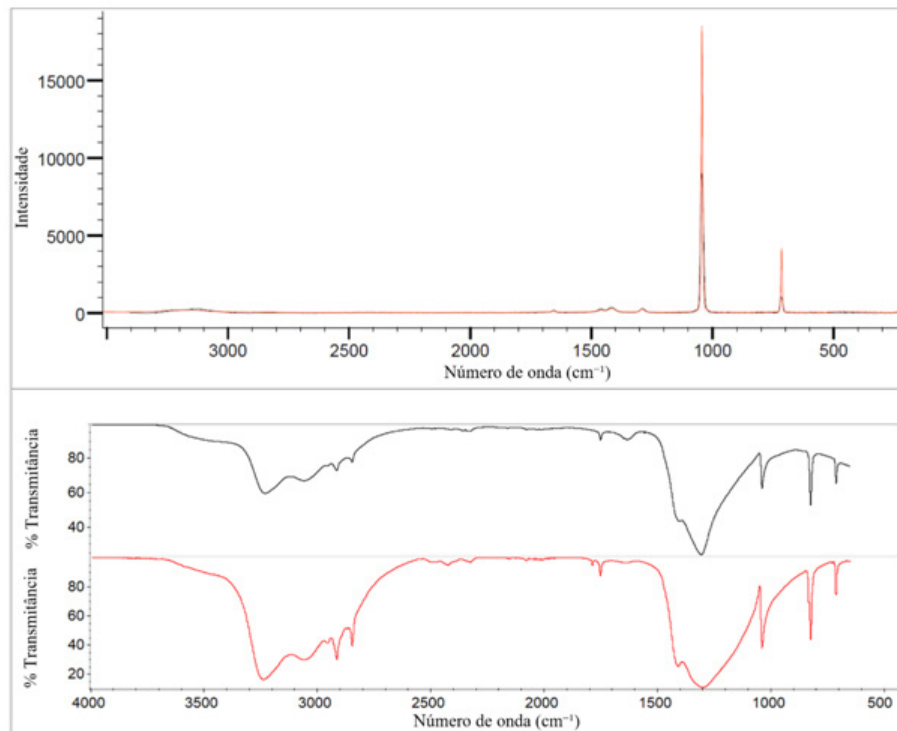


Figura 1 - Resultados típicos obtidos por Raman (acima) e FTIR (abaixo) a partir de uma amostra de emulsão explosiva (em preto), comparados com os espectros padrão (em vermelho)³⁹.

Nas análises por Cromatografia Iônica (CI) dos casos que envolvem resíduos pós-explosão, sem a presença de partículas de explosivos não reagidas visíveis, especificamente no caso de explosivos a base de sais inorgânicos, o objetivo analítico não se limita à identificação dos íons originalmente presentes na formulação do explosivo, mas engloba, também,

os íons associados aos produtos principais e subprodutos formados durante a explosão. A interpretação baseia-se na análise do perfil completo dos íons-alvo, e não na avaliação isolada de cada íon¹. A Tabela 1 ilustra alguns dos íons-alvo de explosivos comumente utilizados em ações criminosas no Brasil³.

Tabela 1 - Misturas explosivas comuns e principais íons-alvo em seus resíduos pós-explosão (Logrado, Braga e Laboissiere, 2023)³.

Explosivos	Composição	Principais íons-alvo na análise de resíduos pós-explosão
Pólvora <i>flash</i>	KClO_4 , Al	Cl^- , ClO_4^- , ClO_3^- , K^+
Pólvora negra	KNO_3 , C, S	SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SCN^- , OCN^- , K^+
Emulsão explosiva	NH_4NO_3 , hidrocarbonetos	NH_4^+ , Na^+ , NO_3^-

A Figura 2 apresenta resultados obtidos por Cromatografia Iônica com Detecção por Condutividade (CI-DC)³⁷ a partir de extratos de resíduos pós-explosão dos explosivos apresentados na Tabela 1. A Figura 3, por sua vez, mostra os

resultados obtidos por CG-EM para a identificação de compostos da fase orgânica de emulsões explosivas, incluindo n-alcenos de C23 a C34, cuja detecção é frequentemente possível tanto em situações pré- quanto pós-explosão³⁹.

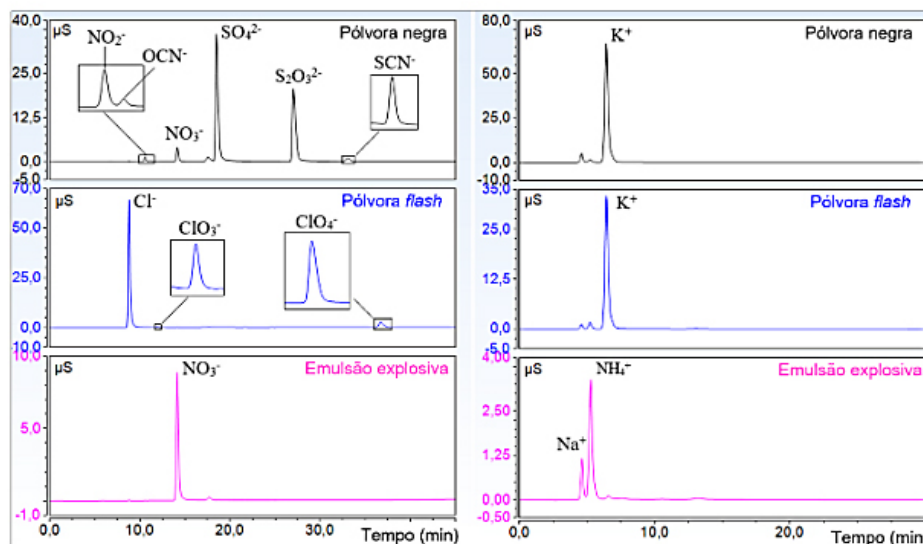


Figura 2 - Cromatogramas iônicos de ânions (esquerda) e cátions (direita) de interesse na análise de resíduos pós-explosão de pólvora negra (em preto), pólvora flash (em azul) e emulsão explosiva (em rosa)³⁷.

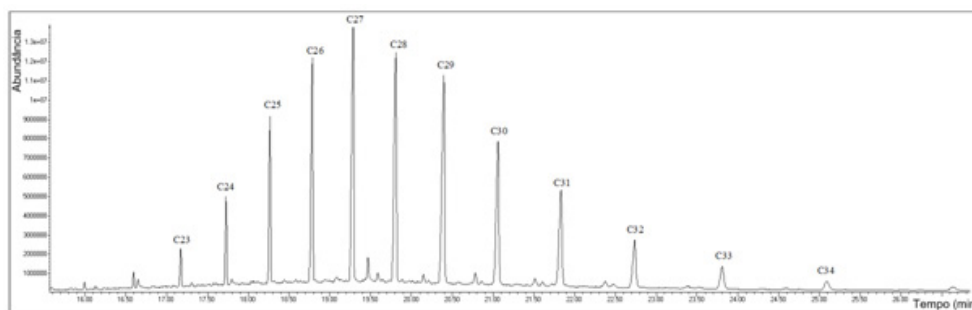


Figura 3 - Cromatograma do extrato em n-hexano de emulsão explosiva, evidenciando a identificação de uma mistura de n-alcenos (C23–C34)³⁹.

Como alguns dos analitos de interesse nesses casos também estão presentes em diversos outros materiais, compreender de que forma isso pode afetar a interpretação dos resultados, bem como conhecer as principais fontes de interferência, é fundamental para minimizar a introdução de interferentes evitáveis e assegurar maior confiabilidade às conclusões analíticas. A seguir, serão apresentados achados obtidos em estudos que investigaram as principais fontes de interferência em análises de resíduos pós-explosão, incluindo materiais utilizados na coleta e no preparo de amostras, uma matriz particularmente relevante no contexto brasileiro - as cédulas - e substâncias carbonáceas, comumente encontradas em locais pós-explosão.

Interferentes inorgânicos em materiais utilizados em coleta e preparo de amostras para análises por cromatografia iônica

Mauricio (2020)²⁵ avaliou a presença de interferentes em materiais de coleta e preparo de amostras comumente utilizados na análise química de resíduos pós-explosão por Cromatografia Iônica (CI). Amostras de suabes forenses, hastes de algodão comuns, discos/bolas de algodões e filtros de seringa de diversas marcas foram avaliadas quanto à presença de íons de interesse. Dos 15 materiais testados, apenas dois filtros de seringa foram considerados isentos de interferentes. Os suabes forenses e dois dos filtros apresentaram

concentrações significativas de alguns íons, incluindo analitos de interesse no contexto aqui abordado, como, por exemplo, Na^+ , K^+ , Cl^- e SO_4^{2-} . Adicionalmente, materiais comerciais comuns, como hastes de algodão, bolas de algodão e discos de algodão, frequentemente utilizados em coletas deste tipo de material, revelaram concentrações consideráveis de Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} . A presença destes íons dificulta a interpretação dos resultados, já que alguns deles são bastante relevantes no contexto em tela, conforme discutido no trabalho. Para avaliar a mitigação desses efeitos por meio de lavagens com água, os materiais foram submetidos a múltiplos ciclos de lavagem. No caso dos suabes e algodões, cada material foi submetido a 4 ciclos de extrações em tubo de ensaio contendo 3 mL de água ultrapura com agitação por 30 segundos em vórtex; para os filtros de seringa, 10 mL de água ultrapura foram passados pelo filtro de 0,45 μm , também em 4 ciclos. Após análises por CI de cada uma das soluções obtidas em cada ciclo, os resultados mostraram que a maioria dos materiais tornou-se adequada para uso após o terceiro ciclo de lavagem, embora alguns materiais tenham apresentado alteração de forma ou compactação, aspecto que deve ser considerado como uma possível limitação. Este procedimento permite que materiais comuns e de fácil acesso possam ser empregados com segurança em análises forenses, desde que previamente preparados. Os resultados reforçam a necessidade de uma análise prévia dos materiais de coleta/amostragem, bem como a importância da utilização de brancos autênticos, visando minimizar o risco de falsos positivos e assegurar maior confiabilidade nos resultados analíticos.

Interferentes orgânicos em materiais utilizados em coleta e preparo de amostras em análises por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas

O estudo realizado por Logrado e Braga (2025)³⁹, versando ainda sobre a coleta e preparo de amostras de resíduos pós-explosão, incluindo extração, filtração e manuseio, avaliou a presença de interferentes orgânicos em materiais de coleta e laboratoriais visando análises por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM). Diversos itens, incluindo filmes plásticos, tampas de frascos, luvas descartáveis, seringas, suabes, copos descartáveis, tubos plásticos e pipetas descartáveis, foram avaliados. Os resultados revelaram que alguns materiais, em especial êmbolos de seringas, luvas e filmes plásticos, apresentaram interferentes orgânicos que podem comprometer as análises de resíduos pós-explosão, particularmente de emulsões explosivas e ANFO (nitrato de amônio/óleo combustível). Nos resultados obtidos para os êmbolos de seringa, foram detectados sinais abrangendo uma longa faixa de interesse no cromatograma, podendo mascarar a presença de analitos de interesse em baixas concentrações e dificultar a interpretação dos resulta-

dos gerando falsos negativos, além da presença de n-alcanos C20–C25 que podem levar a falsos positivos relativos à identificação da fase orgânica de emulsões explosivas. Em algumas das luvas descartáveis testadas foram observados interferentes semelhantes, embora com intensidade menor, podendo, em teoria, levar a falsos negativos; contudo, simulações de manipulação de suabes úmidos indicaram baixa transferência desses compostos. Adicionalmente, os resultados obtidos na avaliação de alguns dos filmes plásticos e de algumas das luvas testados, revelaram a presença de misturas de hidrocarbonetos C23–C34 que se assemelham aos encontrados em emulsões explosivas, mostrando alto potencial para gerar falsos positivos, especialmente quando materiais úmidos são manipulados e extraídos. Estes achados destacam, novamente, a importância de selecionar criteriosamente os materiais utilizados em coletas e preparos laboratoriais para evitar contaminação das amostras. A realização de análises em branco mostrou-se fundamental para prevenir falsos positivos, mas, além disso, a avaliação prévia desses materiais se mostrou crucial para evitar resultados inconclusivos, principalmente em casos de escassez de amostras, nos quais a reanálise dos materiais pode não ser possível. Embora o foco tenha sido em emulsões explosivas e ANFO, os resultados sugerem que essa precaução deve ser estendida para outras misturas explosivas que envolvam hidrocarbonetos em baixas concentrações ou até mesmo na análise de resíduos de líquidos inflamáveis em resíduos de incêndio³⁹.

Interferentes inorgânicos em cédulas (uma matriz comum em casos de explosão de caixas eletrônicos) nas análises por cromatografia iônica

Cédulas são frequentemente submetidas a análises químicas em laboratórios forenses para a detecção de resíduos pós-explosão no Brasil. Essa matriz apresenta desafios únicos devido à presença de analitos alvo provenientes, não apenas da alta circulação, característica deste tipo de material, mas, também, do processo de fabricação, bem como devido à ausência de amostras controle para comparação, comum neste tipo de ocorrência. Além de sua relevância em ataques contra caixas eletrônicos (ATMs), as cédulas são de grande interesse quando apreendidas com indivíduos suspeitos, em veículos ou em locais específicos, podendo fornecer evidências valiosas para estabelecer conexão com cenas de crime. Visando avaliar a influência dessa matriz nas análises de resíduos pós-explosão por cromatografia iônica (CI), Logrado, Braga e Laboissiere (2023)³⁸ realizaram um estudo no qual analisaram 166 cédulas de real, incluindo dez cédulas novas e 15 em circulação para cada denominação (R\$ 2, R\$ 5, R\$ 10, R\$ 20, R\$ 50 e R\$ 100), além de 16 cédulas de R\$ 100 apreendidas em um caso de roubo a banco envolvendo explosivos. As cédulas novas foram obtidas na agência do

Banco do Brasil do Banco Central, enquanto as em circulação foram coletadas aleatoriamente em pedágios e estabelecimentos comerciais no Brasil. As cédulas apreendidas foram obtidas por meio de uma ação da Polícia Federal. Os resultados revelaram a presença de diversos íons de interesse, tais quais Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} , alguns em concentrações significativas, mesmo em cédulas que nunca haviam circulado, indicando alto potencial de interferência em análises, por exemplo, de resíduos pós-explosão de pólvora negra, nas quais se busca pelos íons K^+ , NO_3^- e SO_4^{2-} , entre outros, bem como de pólvora flash, em que os íons K^+ e Cl^- compõe o perfil iônico característico, juntamente com outros íons. A análise quimiométrica por análise de componentes principais (PCA) revelou uma clara separação entre cédulas novas de diferentes valores, enquanto essa distinção não foi observada em cédulas circulantes devido à variação natural dos analitos. Além disso, a abordagem sugere potencial para identificação de resíduos pós-explosão em cédulas, na ausência de partículas visíveis de explosivos. Todavia, estudos complementares são necessários para essa aplicação. Adicionalmente, foi observada a ausência de íons-alvo altamente relevantes, como clorito (ClO_2^-), clorato (ClO_3^-), perclorato (ClO_4^-), tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), tiocianato (SCN^-) e cianato (OCN^-), cuja presença em casos reais poderia indicar contato com resíduos pós-explosão. Estes achados destacam, também, a importância de priorizar materiais alternativos com menor suscetibilidade a interferentes sempre que possível, facilitando a interpretação dos resultados laboratoriais³⁸.

Interferência por adsorção de analitos por substâncias carbonáceas presentes em materiais provenientes de locais pós-explosão nas análises por cromatografia iônica

Outro tipo de interferência foi investigado por Logrado (2025) que estudou a influência de materiais carbonáceos, por adsorção, na extração e análise de resíduos pós-explosão por Cromatografia Iônica (CI)³⁷. Além dos analitos de interesse derivados do explosivo original e de seus produtos de reação, outros resíduos também podem estar presentes nos materiais coletados para análise laboratorial. Entre eles, destacam-se materiais carbonáceos, como fuligem e resíduos carbonizados, formados pelos efeitos térmicos da explosão ou por incêndios a ela associados. Materiais carbonáceos são conhecidos por sua elevada capacidade de adsorção, o que os torna eficazes na retenção de íons. Assim, essa propriedade pode interferir na análise de resíduos pós-explosão, especialmente quando os íons de interesse estão em baixas concentrações, reduzindo os sinais analíticos e dificultando a identificação precisa do explosivo. Visando avaliar este tipo de interferência, foram avaliados três materiais adsorventes — carvão ativado, resíduo de papel carbonizado e carvão vegetal — em relação à sua capacidade de retenção

de íons inorgânicos comumente encontrados em resíduos de combustão/explosão de explosivos, tais quais pólvora negra, pólvora flash à base de perclorato de potássio e alumínio metálico e emulsões explosivas. Os íons analisados incluíram Cl^- , NO_2^- , OCN^- , ClO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SCN^- , ClO_4^- , K^+ , NH_4^+ e Na^+ . Os resultados demonstraram efeitos de retenção específicos para determinados íons de interesse, variando de acordo com o tipo e a quantidade de adsorvente. Experimentos adicionais comparando extrações aquosas à temperatura ambiente e sob aquecimento (90°C) mostraram que o aumento de temperatura não representa uma solução consistente para superar os fenômenos de adsorção. Esses resultados destacam o risco de falsos negativos ou subestimação de analitos devido à presença de resíduos carbonáceos, frequentemente encontrados em amostras pós-explosão³⁷. O estudo ressaltou a importância de considerar a interferência por adsorção ao selecionar partes de amostra para análise, priorizando regiões com menor conteúdo de material carbonáceo, uma vez que explosões frequentemente geram diversos vestígios, incluindo fragmentos de plástico, metal e papel de dispositivos explosivos improvisados (IEDs) ou de objetos afetados, assim como solo, roupas e cédulas, bem como suabs e peças de algodão impregnados com resíduos. Isso permite a coleta de múltiplos materiais, aumentando a probabilidade de obter resultados mais claros e precisos. Embora o foco desse estudo tenha sido em espécies inorgânicas, a reconhecida capacidade dos materiais carbonáceos em adsorver compostos orgânicos sugere que interferências similares podem ocorrer na análise de explosivos orgânicos ou aditivos. Esses achados se estendem para além da CI, sendo relevantes para qualquer técnica analítica que dependa de extrações aquosas em amostras pós-explosão. Os dados reforçam a necessidade de uma avaliação crítica das estratégias de amostragem e procedimentos de extração em análises forenses de resíduos explosivos, garantindo a seleção criteriosa de áreas de amostragem e a compreensão dos materiais presentes para mitigar artefatos analíticos e melhorar a confiabilidade dos resultados³⁷. Adicionalmente, é importante destacar que a interferência por materiais carbonáceos também constitui um aspecto relevante em outra área significativa da química forense: a análise de resíduos de incêndio, tema abordado em trabalho de Logrado e Braga (2025)⁴⁰.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos maiores fatores complicadores na análise de resíduos pós-explosão, especialmente nos casos de misturas combustível-oxidante, é a presença comum de variados tipos de interferentes provenientes de diversas origens, causando diferentes efeitos, tais como: inclusão de analitos-alvo nas amostras, mascaramento de sinais de interesse ou redução do sinal analítico. Dentre as principais fontes de interferência

estão os materiais de coleta e preparo de amostras, matrizes e materiais adsorventes. Estudos que visam entender melhor a origem e os efeitos de potenciais interferentes, bem como formas de minimizá-los, são de extrema importância para analistas que atuam nessa área tão relevante da química forense. Informações, como as constantes nos estudos aqui tratados, contribuem consideravelmente para a facilitação da interpretação dos resultados obtidos, objetivando minimizar chances de falsos positivos, falsos negativos ou subestimação de analitos que possam impactar diretamente os resultados das investigações forenses.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Nacional de Criminalística – Polícia Federal do Brasil (INC-PF), onde os estudos foram conduzidos.

REFERÊNCIAS

1. Logrado LPL, Silva MN, Laboissiere JCA, Braga JWB. Profile of explosives' use in ATMs/cash safes robberies in Brazil. *J Forensic Sci.* 2022;67(4):1441–1449.
2. Logrado LPL, Braga JW. Bulk explosive investigation: chemical analyses of fuel-oxidizer explosive mixtures commonly used in criminal actions. *Braz J Anal Chem.* 2025;12(47).
3. Logrado LPL, Braga JWB. Long-term storage for reanalysis purposes: A stability study of extracts from post-explosion/burning residues of fuel-oxidizer explosive mixtures. *Forensic Chemistry.* 2024;39:100583.
4. Martín-Alberca C, Zapata F, Carrascosa H, Ortega-Ojeda FE, García-Ruiz C. Study of consumer fireworks post-blast residues by ATR-FTIR. *Talanta.* 2016;149:257–65.
5. D'Uva JA, DeTata D, Lewis SW. Source determination of homemade ammonium nitrate using ATR-FTIR spectroscopy, trace elemental analysis and chemometrics. *Forensic Chemistry.* 2022;28:100411.
6. Suppajariyawat P, Elie M, Baron M, Gonzalez-Rodriguez J. Classification of ANFO samples based on their fuel composition by GC–MS and FTIR combined with chemometrics. *Forensic Sci Int.* 2019;301:415–25.
7. Sharma SP, Lahiri SC. Characterization and Identification of Explosives and Explosive Residues Using GC-MS, an FTIR Microscope, and HPTLC. *Journal of Energetic Materials.* 2005;23(4):239–64.
8. Castro K, de Vallejuelo SF, Astondoa I, Goñi FM, Madariaga JM. Analysis of confiscated fireworks using Raman spectroscopy assisted with SEM-EDS and FTIR. *Journal of Raman Spectroscopy.* 2011;42(11):2000–5.
9. Wackerbarth H, Salb C, Gundrum L, Niederkrüger M, Christou K, Beushausen V, et al. Detection of explosives based on surface-enhanced Raman spectroscopy. Lewis C, Burgess D, editors. *Appl Opt.* 2010;49(23):4362.
10. Otieno-Alego V. Some forensic applications of a combined micro-Raman and scanning electron microscopy system. *Journal of Raman Spectroscopy.* 2009;40(8):948–53.
11. Malka I, Petrushansky A, Rosenwaks S, Bar I. Detection of explosives and latent fingerprint residues utilizing laser pointer-based Raman spectroscopy. *Applied Physics B.* 2013;113(4):511–8.
12. Almaguila S, Botti S, Cantarini L, Palucci A, Puiu A, Rufoloni A, et al. Trace detection of explosives and their precursors by surface enhanced Raman spectroscopy. Lewis C, Burgess D, editors. *Talanta.* 2012;78(3):854602.
13. Zapata F, García-Ruiz C. Determination of Nanogram Microparticles from Explosives after Real Open-Air Explosions by Confocal Raman Microscopy. *Anal Chem.* 2016;88(13):6726–33.
14. Almeida MR, Correa DN, Zacca JJ, Logrado LPL, Poppi RJ. Detection of explosives on the surface of banknotes by Raman hyperspectral imaging and independent component analysis. *Anal Chim Acta.* 2015;860:15–22.
15. Nuntawong N, Eiamchai P, Limwichean S, Wong-ek B, Horprathum M, Patthanasettakul V, et al. Trace detection of perchlorate in industrial-grade emulsion explosive with portable surface-enhanced Raman spectroscopy. *Forensic Sci Int.* 2013;233:174–8.
16. Almeida MR, Logrado LPL, Zacca JJ, Correa DN, Poppi RJ. Raman hyperspectral imaging in conjunction with independent component analysis as a forensic tool for explosive analysis: The case of an ATM explosion. *Talanta.* 2017;174:628–32.
17. Zapata F, de la Ossa MÁF, Gilchrist E, Barron L, García-Ruiz C. Progressing the analysis of Improvised Explosive Devices: Comparative study for trace detection of explosive residues in handprints by Raman spectroscopy and liquid chromatography. *Talanta.* 2016;161:219–27.
18. Logrado LPL, Miguel Ferreira da Silva B, Amaro da Silveira Neto B. Assessment of handheld Raman spectroscopy for forensic analysis of dark-colored bulk explosive fuel–oxidizer mixtures. *J Forensic Sci.* 2025;70(4):1509–1520.
19. Barron L, Gilchrist E. Ion chromatography-mass spectrometry: A review of recent technologies and applications in forensic and environmental explosives analysis. *Anal Chim Acta.* 2014;806:27–54.
20. McCord BR, Hargadon KA, Hall KE, Burmeister SG. Forensic analysis of explosives using ion chromatographic methods. *Anal Chim Acta.* 1994;288:43–56.
21. Johns C, Shellie RA, Potter OG, O'Reilly JW, Hutchinson JP, Guijt RM, et al. Identification of homemade inorganic explosives by ion chromatographic analysis of post-blast residues. *J Chromatogr A.* 2008;1182(2):205–14.
22. Dicinoski GW, Shellie RA, Haddad PR. Forensic Identification of Inorganic Explosives by Ion Chromatography. *Anal Lett.* 2006;39(4):639–57.
23. Kolla P. Trace analysis of salt based explosives by ion chromatography. *Forensic Sci Int.* 1991;50(2):217–26.
24. Meng H, Wang T, Guo B, Hashi Y, Guo C, Lin J. Simultaneous determination of inorganic anions and cations in explosive residues by ion chromatography. *Talanta.* 2008;76(2):241–5.

25. Mauricio FGM, Abritta VRM, de Lacerda Aquino R, Ambrósio JCL, Logrado LPL, Weber IT. Evaluation of interferers in sampling materials used in explosive residue analysis by ion chromatography. *Forensic Sci Int.* 2020;307:109908.
26. Szomborg K, Jongekrijg F, Gilchrist E, Webb T, Wood D, Barron L. Residues from low-order energetic materials: The comparative performance of a range of sampling approaches prior to analysis by ion chromatography. *Forensic Sci Int.* 2013;233:55–62.
27. Gregory KE, Kunz RR, Hardy DE, Fountain AW, Ostazeski SA. Quantitative Comparison of Trace Organonitrate Explosives Detection by GC-MS and GC-ECD2 Methods with Emphasis on Sensitivity. *J Chromatogr Sci.* 2011;49(1):1–7.
28. Sigman M, Ma CY. Detection Limits for GC/MS Analysis of Organic Explosives. *J Forensic Sci.* 2001;46(1):6–11.
29. Lai H, Leung A, Magee M, Almirall JR. Identification of volatile chemical signatures from plastic explosives by SPME-GC/MS and detection by ion mobility spectrometry. *Anal Bioanal Chem.* 2010;396(8):2997–3007.
30. Greenberg, JA, Carpenter, J. X-Ray Diffraction for Explosives Detection. In: Kagan, A, Oxley, JC. *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier; 2022. p. 315–338.
31. Bowlan P, Suvorova N, Remelius D, Smilowitz L, Henson BF. Tracking Thermal Decomposition Chemistry in Secondary Solid Explosives with X-ray Diffraction. *J Phys Chem A.* 2022;126(27):4497–506.
32. Kashkarov AO, Prueel ER, Ten KA, Rubtsov IA, Gerasimov EY, Zubkov PI. Transmission electron microscopy and x-ray diffraction studies of the detonation soot of high explosives. *J Phys Conf Ser.* 2016;774:012072.
33. Schachel TD, Stork A, Schulte-Ladbeck R, Vielhaber T, Karst U. Identification and differentiation of commercial and military explosives via high performance liquid chromatography – high resolution mass spectrometry (HPLC-HRMS), X-ray diffractometry (XRD) and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF): Towards a forensic substance database on explosives. *Forensic Sci Int.* 2020;308:110180.
34. Kotrly M, Turkova I. New Possibilities of Complex Analysis of Explosives and Post Blast Residues in Forensic Practice. *Microscopy and Microanalysis.* 2020;26(S2):816–7.
35. Gottfried JL, De Lucia FC, Munson CA, Miziolek AW. Laser-induced breakdown spectroscopy for detection of explosives residues: a review of recent advances, challenges, and future prospects. *Anal Bioanal Chem.* 2009;395(2):283–300.
36. Serrano J, Moros J, Sánchez C, Macías J, Laserna JJ. Advanced recognition of explosives in traces on polymer surfaces using LIBS and supervised learning classifiers. *Anal Chim Acta.* 2014;806:107–16.
37. Logrado LPL. Assessment of adsorption interference from carbonaceous materials in post-explosion residue analysis of fuel–oxidizer mixtures by ion chromatography. *Forensic Chemistry.* 2025;44:100671.
38. Logrado LPL, Braga JW, Laboissiere JC. Assessment of Banknotes as a Matrix for Detecting Post-Explosion Residues of Fuel–Oxidizer Explosive Mixtures Using Ion Chromatography. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry.* 2023;11(43):101-114.
39. Logrado LPL, Braga JWB. Evaluation of interferents in sampling materials for analysis of post-explosion residues (explosive emulsion/ANFO) using gas chromatography–mass spectrometry (GC/MS). *J Forensic Sci.* 2025;70(1):314–22.
40. Logrado LPL, Braga JWB. SPME–GC–MS analysis of fire debris: assessing sample transfer viability for automated analysis and the influence of sooty materials. *Forensic Chemistry.* 2025;45:100688.