

Degradação Ambiental do Coque de Petróleo: Riscos para a Segurança em Ambientes Confinados

Environmental Degradation of Petroleum Coke: Risks to Safety in Confined Spaces

Amanda Marques Lopes Estolano¹

 orcid.org/0000-0002-3045-9117

Larissa Fonseca Torres Sá²

 orcid.org/0009-0000-6227-8807

Eliane Maria Gorga Lago³

 orcid.org/0000-0003-0987-3492

Felipe Mendes da Cruz⁴

 orcid.org/0000-0002-0163-465X

¹Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail: amanda.estolano@ufpe.br

²Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail: lfts@poli.br

³Núcleo de Higiene e Segurança do Trabalho, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail: elianelsht@poli.br

⁴Núcleo de Higiene e Segurança do Trabalho, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail: felipemendeslht@poli.br

DOI: 10.25286/repa.v10i2.3157

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Amanda Marques Lopes Estolano; Larissa Fonseca Torres Sá; Eliane Maria Gorga Lago; Felipe Mendes da Cruz. Degradação Ambiental do Coque de Petróleo: Riscos para a Segurança em Ambientes Confinados. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.10, n. 2, p. 1-6, 2025.

RESUMO

A caracterização microestrutural de materiais pode ser uma ferramenta decisiva para a identificação de condições que intensificam os riscos químicos em espaços confinados industriais. Este estudo investiga o armazenamento de coque de petróleo em um túnel industrial, analisando as alterações microestruturais do material com o uso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A pesquisa enfatiza como variáveis ambientais, como umidade e contato com o solo, influenciam a composição e a estabilidade do coque. As análises revelaram diferenças significativas entre amostras coletadas no pátio (com aspecto seco e composição padrão) e no interior do túnel (úmidas, heterogêneas e com maior presença de partículas finas – PM10). A interação de elementos como carbono, ferro, silício e alumínio em ambientes úmidos pode potencializar riscos à saúde dos trabalhadores e aumentar a probabilidade de eventos críticos, como explosões. Os resultados reforçam a importância da análise microestrutural não apenas como diagnóstico técnico, mas como base estratégica para o planejamento de medidas de controle, incluindo a elaboração de planos de ventilação adequados à realidade do ambiente confinado.

PALAVRAS-CHAVE: Microscopia; Segurança; Risco; Espaço Confinado;

ABSTRACT

Microstructural characterization of materials can be a decisive tool for identifying conditions that intensify chemical risks in industrial confined spaces. This study investigates the storage of petroleum coke inside an industrial tunnel, analyzing microstructural changes in the material using Scanning Electron Microscopy (SEM). The research highlights how environmental variables such as moisture and soil contact influence the composition and stability of the coke. The analyses revealed significant differences between samples collected from the yard (dry appearance and standard composition) and those from inside the tunnel (moist, heterogeneous, and with a higher presence of fine particles – PM10). The interaction of elements such as carbon, iron, silicon, and aluminum in humid environments can increase health risks for workers and raise the likelihood of critical events such as explosions. The findings reinforce the importance of microstructural analysis not only as a technical diagnostic tool but also as a strategic foundation for planning control measures, including the development of ventilation plans tailored to the confined space environment.

KEY-WORDS: Microscopy; Safety; Risk; Confined Space;

1 INTRODUÇÃO

Espaços confinados representam ambientes industriais com configurações físicas que limitam a movimentação e dificultam o acesso e a evacuação. São encontrados em estruturas como tanques, silos, vasos de pressão, redes de esgoto e outras instalações utilizadas principalmente para operações esporádicas de manutenção, inspeção ou limpeza. Suas características geométricas e as condições atmosféricas instáveis tornam esses locais especialmente propensos a riscos que exigem análise detalhada e abordagens de controle específicas [1].

Um dos aspectos mais críticos na identificação desses ambientes é a limitação de entradas e saídas, que pode comprometer severamente as ações de resgate em situações emergenciais. Além disso, esses espaços apresentam elevado potencial para mudanças rápidas na atmosfera interna, com risco de acúmulo de gases tóxicos ou redução de oxigênio a níveis perigosos — condição já apontada por Botti *et al.* [2] como fator recorrente em acidentes. Estruturas acessadas de forma intermitente, como tanques de armazenamento de produtos químicos, geralmente operam sob condições incertas e, por isso, exigem métodos de avaliação de risco adaptados às suas particularidades [1].

A inexistência de diretrizes uniformes para gerenciamento de riscos, combinada à insuficiência de treinamentos, falhas no controle de acesso e supervisão ineficaz, segue como causa significativa de incidentes. Segundo Burette-Vienney *et al.* [3], estratégias sistemáticas de controle — como a definição de procedimentos para ventilação, capacitação de equipes e protocolos de emergência — são fundamentais para reduzir a exposição a perigos nesses espaços. Elementos frequentemente ignorados, como o tempo necessário de ventilação antes da entrada ou a supervisão de prestadores de serviço, podem comprometer a segurança de toda a operação.

Adicionalmente, partículas inaláveis como PM10 e PM2,5 contribuem para a elevação dos riscos em espaços confinados. Essas partículas não só afetam a saúde respiratória dos trabalhadores, ao penetrarem profundamente nos pulmões, como também podem servir de combustível em cenários de explosão. A baixa taxa de ventilação favorece o acúmulo de poeira fina, criando condições críticas. Estudo conduzido por Yang *et al.* [4] reforça essa preocupação ao analisar explosões envolvendo

partículas combustíveis, nas quais a combinação de altas concentrações, confinamento e fontes de calor gerou eventos de grande intensidade.

Pesquisas sobre ambientes subterrâneos apontam ainda para padrões sazonais na concentração de partículas, influenciados por fatores operacionais como frenagem de equipamentos e circulação de ar restrita — como observado por Rakotonirinjannahary *et al.* [5]. Esses achados evidenciam a urgência de estratégias de controle contínuas e baseadas em dados concretos.

Diante desse cenário, este estudo destaca o papel da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) como ferramenta capaz de identificar, em escala microscópica, alterações na estrutura dos materiais armazenados em espaços confinados. A caracterização microestrutural contribui para reconhecer sinais de degradação e presença de agentes perigosos, subsidiando decisões mais precisas. Associar esse diagnóstico à elaboração de planos de ventilação personalizados fortalece a gestão integrada de riscos e amplia a segurança das operações nesses ambientes complexos.

2 ESTUDO DE CASO

A investigação foi conduzida em um túnel desativado, anteriormente utilizado para transporte de coque de petróleo, subproduto sólido proveniente da etapa de craqueamento do refino. Com 130 metros de comprimento, 6 metros de largura e 4,7 metros de altura, o túnel se enquadra nos critérios de espaço confinado conforme a NR-33, por não ser destinado à ocupação contínua, apresentar acessos restritos e oferecer potencial para atmosferas perigosas. A análise abrangeu tanto o interior do túnel quanto sua área adjacente, a fim de distinguir as condições do espaço em operação (perturbado) e fora de uso (não perturbado), permitindo uma avaliação mais ampla dos riscos.

Durante a inspeção, observou-se diferença significativa entre o material do entorno e aquele armazenado no interior, o que motivou uma caracterização aprofundada do agente químico — o coque — com ênfase em suas propriedades físico-químicas e comportamento em diferentes condições ambientais. Esta caracterização é estratégica para a definição de medidas de controle, como a seleção adequada de Equipamentos de Proteção Respiratória (EPR) e a análise do risco de explosão associado à presença de partículas finas.

A coleta de amostras foi realizada em dois pontos: no pátio externo, representando o material

seco e disperso no ar, e dentro do túnel, onde o material apresentava-se em estado pastoso, com aparência heterogênea devido à umidade e ao contato prolongado com o solo. Para analisar a composição e estrutura do coque, aplicaram-se técnicas complementares: Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

A DRX foi conduzida com equipamento Bruker D2 Phaser, operando em condições específicas para identificação das fases cristalinas. Ambas as amostras indicaram a presença de grafite, mas apenas o material do interior do túnel revelou fases adicionais — Albita, Biotita e Quartzo — comuns em materiais terrosos, sugerindo contaminação por solo. Este resultado aponta para alterações na composição do material que podem intensificar riscos ocupacionais.

A análise microestrutural com MEV (modelo MIRA3, Tescan), combinada com a aplicação de camada condutora de ouro/paládio, permitiu observações em alta resolução da morfologia e do tamanho das partículas. Essa abordagem é importante quando se trata de segurança ocupacional, pois a geometria e granulometria influenciam diretamente na penetração do agente nos pulmões e no risco de ignição.

Por fim, a espectroscopia EDS complementou os resultados, permitindo a identificação qualitativa e quantitativa dos elementos presentes — como carbono, ferro, alumínio e silício — e possibilitando a avaliação do potencial reativo do material em ambientes úmidos. Este fator é particularmente relevante para planejamento de ventilação, visto que a interação química em condições específicas pode alterar significativamente a atmosfera do espaço.

Com essa abordagem integrada, o estudo oferece subsídios técnicos para análises de risco mais robustas, destacando a importância de técnicas microestruturais na formulação de planos de ventilação, escolha de EPRs e estratégias preventivas em espaços confinados industriais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ARMAZENADO

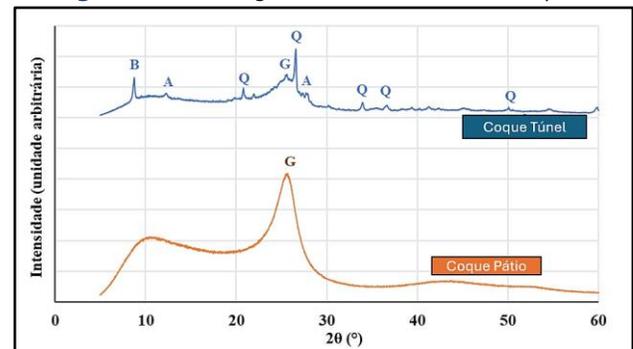
A caracterização do material armazenado forneceu ao estudo subsídios para a elaboração de uma medida de controle eficiente no interior do espaço confinado. Dessa forma, análise

morfológica, cristalográfica e de perda de massa foi essencial para entender o comportamento do material submetido a diferentes contextos.

3.1.1 Difração de Raios X (DRX)

A análise de DRX é amplamente utilizada para estudar a cristalinidade do coque e para identificar a presença de diferentes formas de carbono, como o grafite, que pode ser formado durante o processo de aquecimento e carbonização. O grafite foi identificado nas duas amostras, de acordo com a Figura 1. Porém, apenas a amostra no interior do espaço apresentou outras fases cristalinas: Albita, Biotita e Quartzo. Essas estruturas são comumente encontradas no solo.

Figura 1 – Difratoograma das amostras de coque.



Fonte: Os Autores.

3.1.2 Análise Morfológica e de Tamanho de Grão com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

O MEV permite a observação de microestruturas com alta resolução, a medição precisa do tamanho de grão, a análise da morfologia superficial e a identificação da composição elementar das amostras. Essa análise, no âmbito de Segurança do Trabalho, permite identificar as características morfológicas do agente químico, e contribui na tomada de decisão para seleção adequada de Equipamentos de Proteção Respiratória através da geometria e tamanho das partículas.

A micrografia do Coque mostrou tamanhos de partículas variando de 50 μm e 0,5 μm , podendo atingir tamanhos na ordem de nanômetros. Partículas com diâmetro menor que 10 micrômetros, conhecidas como PM10 (particulate matter $\leq 10 \mu\text{m}$), representam um risco significativo à saúde dos trabalhadores, especialmente em ambientes industriais, de

tendem a reagir, formando compostos como carbonatos e hidróxidos, que mudam o comportamento físico-químico da superfície do coque. O oxigênio, presente em grande quantidade, reforça a evidência de processos oxidativos em andamento, afetando tanto o carbono quanto os metais. Já o potássio aparece possivelmente sob forma de sais solúveis, como cloretos ou sulfatos, cuja presença pode estar associada a reações com compostos sulfurosos e à formação de ácidos, como o ácido sulfúrico. O alumínio, por sua vez, pode ter se incorporado ao material tanto por contato com solo contaminado quanto por resíduos de catalisadores utilizados na etapa de refino.

Além da composição, é importante considerar as reações típicas em ambientes úmidos. A oxidação é uma das principais, acelerada pela presença simultânea de umidade e oxigênio, afetando diversos componentes do material. A lixiviação, também favorecida pela água, contribui para a mobilização de metais pesados e outros contaminantes, com potenciais riscos ambientais e ocupacionais. A corrosão de metais como ferro e vanádio, por fim, pode comprometer tanto a estrutura do material quanto instalações próximas.

Esses achados mostram como as condições de armazenamento impactam diretamente a composição e o comportamento do coque de petróleo, especialmente em espaços confinados. A compreensão desses processos é essencial para garantir a segurança das operações e prevenir riscos associados à exposição prolongada desses materiais em ambientes inadequados.

3.1.2 Análise térmica por perda de massa

A análise térmica de materiais combustíveis desempenha um papel fundamental na caracterização de suas propriedades físicas e químicas, especialmente quando submetidos a variações de temperatura. Esse tipo de estudo permite compreender o comportamento dos materiais durante processos como degradação, oxidação e combustão, sendo essencial para avaliar não apenas a segurança, mas também a eficiência energética e os impactos ambientais associados ao seu uso ou descarte.

Considerando as características específicas do coque de petróleo estudado, optou-se por realizar o ensaio térmico em mufla, com aquecimento progressivo de 25°C até 180°C. As duas amostras, uma coletada em pátio aberto e outra em espaço confinado, foram submetidas simultaneamente à análise, acondicionadas em cadinhos de alumínio.

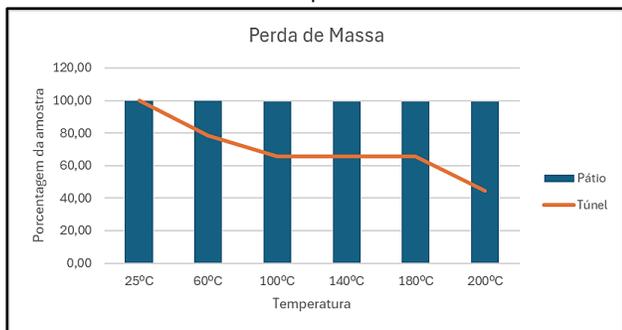
Desde o início do aquecimento, foi possível observar comportamentos distintos entre os materiais, diretamente relacionados à composição química e ao teor de umidade de cada um.

A amostra coletada no pátio, com aspecto seco em razão da exposição prolongada ao sol, não apresentou perda de massa significativa até os 200°C, como mostra a Figura 4. Isso indica estabilidade térmica nessa faixa de temperatura, sem ocorrência de combustão, oxidação ou decomposição visível do material sólido. Em contrapartida, a amostra retirada do túnel apresentou consistência pastosa e uma composição visivelmente heterogênea, com elevado teor de umidade. Essa condição resultou em perda de massa considerável até os 100°C, provavelmente associada à evaporação da água presente no material. A partir dos 180°C, ambas as amostras passaram a apresentar um comportamento térmico semelhante, mas foi observado que, aos 200°C, a amostra do túnel perdeu cerca de 33% de sua massa inicial — valor que pode estar relacionado à liberação de matéria orgânica ou à degradação de componentes presentes na matriz heterogênea da amostra.

Segundo a literatura, tanto o ponto de ignição quanto o de combustão do coque de petróleo ocorrem em temperaturas mais elevadas. Isso indica que, aos 200°C, o material ainda não apresenta risco direto de combustão espontânea. No entanto, essa temperatura é suficiente para induzir o aquecimento do material e iniciar a liberação de compostos voláteis, que podem se tornar inflamáveis caso haja mistura com o ar e presença de uma fonte de ignição. Outro fator relevante está na granulometria: partículas finas de coque — como observado em determinadas porções da amostra úmida — tendem a apresentar ponto de combustão inferior ao das partículas maiores. Isso ocorre porque a maior área superficial relativa favorece a interação com o oxigênio, o que pode facilitar a ignição e acelerar a propagação das chamas.

Diante disso, a avaliação térmica reforça a importância do controle de temperatura em ambientes onde o coque de petróleo esteja presente, sobretudo em espaços confinados. É recomendável que temperaturas internas ou geradas por equipamentos e processos não ultrapassem os 180°C, a fim de evitar a liberação de gases inflamáveis e possíveis riscos de combustão, especialmente quando se lida com materiais heterogêneos ou com partículas finas.

Figura 4 – Gráfico de perda de massa das amostras de coque.



Fonte: Os Autores.

5 CONCLUSÕES

A caracterização microestrutural e química do coque de petróleo, especialmente em ambientes confinados, revela-se uma ferramenta importante para a gestão dos riscos ocupacionais associados a esse material. A identificação de partículas finas (PM10), com potencial de penetração profunda no sistema respiratório e possível absorção pela corrente sanguínea, levanta preocupações relevantes quanto à saúde dos trabalhadores expostos. A presença de metais pesados e compostos tóxicos, frequentemente detectados nas amostras, reforça a necessidade de adoção de medidas preventivas rigorosas, uma vez que tais substâncias estão associadas ao desenvolvimento de doenças crônicas, incluindo neoplasias pulmonares.

Do ponto de vista térmico, os resultados obtidos indicam que, embora o coque de petróleo não apresente comportamento inflamável até 200°C, essa temperatura pode ser suficiente para promover a liberação de compostos voláteis inflamáveis, caso estejam presentes condições favoráveis à ignição. Além disso, a presença de partículas finas amplia o risco de combustão devido ao aumento da área superficial reativa, o que pode favorecer a formação de atmosferas explosivas em espaços confinados. Assim, recomenda-se que a temperatura local, especialmente próxima a fontes de calor ou equipamentos, seja mantida abaixo de 180°C, como medida de controle preventivo.

A análise realizada também subsidia decisões importantes quanto à proteção coletiva e individual no ambiente de trabalho. A seleção de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) deve considerar as características físico-químicas do material, priorizando respiradores adequados à retenção de partículas finas e luvas compatíveis com o manuseio de compostos potencialmente tóxicos. Paralelamente, o dimensionamento de sistemas de

ventilação e exaustão deve ser orientado pelos dados analíticos, garantindo a renovação eficiente do ar e a manutenção da qualidade atmosférica dentro dos limites seguros.

O monitoramento contínuo da atmosfera nos locais de trabalho, aliado à análise periódica das condições do material armazenado, configura uma estratégia essencial para a detecção precoce de alterações nos níveis de risco. Essa abordagem possibilita intervenções rápidas e assertivas, contribuindo para a prevenção de acidentes e a preservação da saúde ocupacional.

Por fim, os resultados reforçam a importância de capacitação técnica das equipes envolvidas nas atividades com coque de petróleo. A compreensão dos riscos e das medidas de controle associadas ao material, baseada em evidências laboratoriais, é fundamental para a condução segura das operações em ambientes confinados.

Portanto, a integração entre análise técnica, engenharia de controle, gestão de riscos e capacitação profissional constitui a base para um ambiente de trabalho mais seguro, eficiente e em conformidade com os princípios da saúde e segurança ocupacional.

REFERÊNCIAS

- [1] Gonzalez-Cortes, A., Burlet-Vienney, D., & Chinniah, Y. (2021). Inherently safer design: An accident prevention perspective on reported confined space fatalities in Quebec. **Process Safety and Environmental Protection**, 149, 794–816.
- [2] Botti, L., Mora, C., & Ferrari, E. (2022). Design of a digital tool for the identification of confined spaces. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 76, 104731.
- [3] Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Bahloul, A., & Roberge, B. (2015). Occupational safety during interventions in confined spaces. **Safety Science**, 79, 19–28.
- [4] Yang, Y., Luo, Z., Ding, X., Zhang, F., Luo, C., Zhang, H., & Shu, C. M. (2024). Effects of dust concentration, particle size, and crude oil concentration on the explosion characteristics of oil-immersed coal dust. **Fuel**, 356, 129596.
- [5] Rakotonirinjannahary, V., Crumeyrolle, S., Bogdan, M., & Hanoune, B. (2024). Typical daily profiles of PM concentrations in parisian underground railway stations. **arXiv preprint arXiv:2409.08291**, 2024.