



# SUPORTE ECOLÓGICO PARA APLICAÇÃO SUPRESSORES DE FOGO EM ESPAÇOS CONFINADOS

**Tema:** Redes de Distribuição

**Autores:** Amanda A. Soares, Luã T.T. de Melo, Pedro H. dos S. S. Teixeira, Giovanni N. M. de S, Emerson P. Fernandes, Ângelo R. de Oliveira, Antonio M. M. S. Lameirão, Mabelle C. M. da Rocha, Victor S. Cruz, Lucas M. Souza, Patrícia S. de O. Patrício, Patterson P. de Souza

**Co-Autores:** -

**Empresa:** Light Serviços de Eletricidade S.A

---

## Resumo

Um novo método para aplicação de supressores de fogo foi validado utilizando-se sais de bicarbonato e carbonato, materiais com propriedades bem documentadas de supressão de fogo. Esses sais foram incorporados aos poros internos da Argila Expandida Leve, escolhida como material de suporte para aplicação em espaços confinados. A combinação de supressor e argila foi testada em condições reais, especificamente dentro de caixas de medidores de energia blindadas, frequentemente alvos de incêndios criminosos. Os incêndios nessas caixas causam perdas significativas para distribuidoras de energia e as comunidades afetadas. Após a exposição ao calor, os sais de carbonato se decompõem, liberando dióxido de carbono, que, juntamente com as propriedades isolantes do suporte de argila, extingue efetivamente o fogo e protege os componentes elétricos internos. Para confirmar a incorporação dos sais e a eficiência da liberação de CO<sub>2</sub>, foram realizadas as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura e Cromatografia Gasosa com Detecção por Ionização de Descarga de Barreira, seguidas de um teste de supressão de fogo em escala real. Os resultados demonstraram sucesso na supressão do fogo, com 5 a 20% do espaço confinado ocupado por CO<sub>2</sub>. Além disso, o uso de materiais baratos e acessíveis permite a produção em grande escala com uma relação custo-benefício favorável.

## 1. Introdução

A maioria dos supressores de fogo tradicionais contém agentes químicos que, embora eficazes, apresentam riscos de toxicidade para os ocupantes e para o meio ambiente, além de serem difíceis de remover após o uso. Em espaços confinados, como veículos, salas de equipamentos, áreas de armazenamento, silos ou caixas de medidores de energia blindadas, esses sistemas podem gerar resíduos prejudiciais, não são adequados para ambientes propensos a processos corrosivos. Portanto, a investigação de soluções ecológicas usando agentes não tóxicos apresenta um desafio crítico e permanece pouco explorada na literatura.

Inúmeros estudos avaliaram a eficiência de várias substâncias como supressores de fogo. Após a determinação do Protocolo de Montreal, em 1989, que proibiu o uso de Halon 1301 (Bromotrifluorometano, CF<sub>3</sub>Br), a busca por alternativas limpas e eficazes de supressores se intensificou (TAPSCOTT et al., 2001).

O bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), por exemplo, já estava sendo estudado como supressor de explosões em silos de grãos antes do Protocolo de Montreal (HERTZBERG et al., 1984), (KORDYLEWSKI; AMRO-GOWICZ, 1992) e foi revisitado em pesquisas realizadas após o Protocolo, continuando a ser investigado nos últimos anos (BAKIRTZIS et al., 2009; CHELLIAH et al., 2000; CHEN et al., 2017; FAN et al., 2019; HAMINS, 1998). Outros estudos notáveis incluem aqueles sobre gases inertes (SENECAL, 2005), o mineral estruvita (tanto em forma sintética quanto recuperada de águas residuais) (GUO et al., 2019; KIM et al., 2021; MOSTASHARI et al., 2008; YETILMEZSOY et al., 2020) e cloretos de metais alcalinos (CAO et al., 2015; SHILLING; DLUGOGORSKI; KENNEDY ERIC, 1998). Compostos orgânicos halogenados com baixos pontos de ebulição também foram explorados (KOROBENICHEV et al., 2012; SHMAKOV et al., 2006), assim como zeólitas (NI et al., 2014). Pesquisas recentes se expandiram para materiais inovadores, como *Dry Water* (CHAI et al., 2024; CHEN et al., 2019; FAN; JIANG; JIANG, 2021; WANG et al., 2021), hidrogéis (LI et al., 2024) e retardantes ecológicos, como a seiva do pseudocaule de banana, um subproduto de resíduos agrícolas. (BASAK et al., 2015, 2016)

No contexto de outras aplicações, os agregados leves de argila expandida (do inglês *Lightweight Expanded Clay Aggregate*, LECAs) representam uma adição promissora às estratégias de proteção contra incêndios, devido às suas estruturas altamente porosas e quimicamente estáveis. Compostas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, podem também conter quantidades variadas de metais alcalinos e alcalino-terrosos, materiais orgânicos, sais solúveis e partículas de outros minerais, incluindo formas não cristalinas ou amorfas (SANTOS, 1989). Além disso, as LECAs podem ser obtidas a partir de resíduos de processos industriais (ADHIKARY; ASHISH, 2022; BAYOUSSEF et al., 2021; BURBANO-GARCIA et al., 2021; JAHN et al., 2024), o que aumenta sua relevância no contexto do uso de materiais sustentáveis.

Dessa forma, o uso de uma ampla variedade de compostos químicos, individualmente ou em combinação com outros materiais, é observado para alcançar efeitos supressores ou retardantes. Seguindo essa abordagem, a combinação proposta neste trabalho consiste na utilização das LECAs como material de suporte, modificados pela incorporação de um sal supressor/retardante em sua estrutura interna porosa e em sua superfície. Na seleção dos compostos iônicos para essa incorporação, diversas características-chave foram priorizadas. Primeiro, a presença de íons carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) ou outros íons "carbonatados" (como íons acetato (KOSHIBA; HIRAKAWA, 2023),  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$ ) é essencial. Sob exposição ao calor, esses íons se decompõem, liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água. O  $\text{CO}_2$  é um componente primário em extintores para incêndios elétricos ou líquidos inflamáveis, pois é não condutivo e não deixa resíduos que possam danificar componentes elétricos (RAJPUT; SAIKIA, 2018). Em termos de estabilidade térmica, os bicarbonatos se decompõem a temperaturas mais baixas (entre 100 e 200 °C), enquanto os carbonatos apenas se decompõem a temperaturas superiores a 800 °C, formando, por fim, seus respectivos óxidos (LEHMAN; GENTRY; GLUMAC, 1998). Um exemplo relevante de aplicação desse aparato seria em caixas blindadas de energia que abrigam dispositivos eletrônicos críticos (ambientes confinados complexos), um problema enfrentado por concessionárias de energia que utilizam esses dispositivos, mostrado na Figura 1. Quando o fogo atinge essas caixas, os danos resultantes são significativos, comprometendo a integridade dos equipamentos e gerando altos custos de substituição e reparo. Esses incêndios podem ter origem intencional ou acidental, devido a superaquecimento ou falhas elétricas.



*Figura 1. À esquerda, detalhe da caixa de energia blindada e ao lado a sua instalação. Fonte: Light/Divulgação.*

Portanto, este estudo concentrou-se no desenvolvimento de uma solução que não apenas atendesse aos requisitos de supressão de chamas, mas também fosse rápida e simples de produzir, utilizando materiais básicos e acessíveis, além de ser fácil de instalar e gerenciar nesses ambientes. Além da supressão de chamas, os materiais devem inibir a condução térmica no espaço confinado para proteger os componentes eletrônicos, muitas vezes feitos de materiais termoplásticos que podem derreter e deformar com o calor, alimentando ainda mais as chamas. Enquanto esses plásticos são altamente inflamáveis, materiais cerâmicos, como minerais de argila, são conhecidos por suas excelentes propriedades de isolamento térmico, tornando-os uma escolha adequada para essa aplicação.

O objetivo deste trabalho foi produzir agregados leves de argila expandida (LECAs) modificados pela incorporação de um supressor/retardante de fogo em sua estrutura interna porosa e em sua superfície. Para aplicação prática, as LECAs-modificadas foram colocadas dentro de uma caixa de energia blindada. Quando uma fonte de calor é introduzida próxima ao ponto de entrada dos cabos, os sais se decompõem, liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no espaço confinado. Isso resulta em um material eficiente que combina o isolamento térmico natural das LECAs com as propriedades de supressão de fogo do  $\text{CO}_2$ . Além disso, os metais presentes nos sais, como sódio ou potássio, atuam como sequestrantes de radicais que propagam as chamas (JIANG; CHOW; LI, 2007) (SHILLING; DLUGOGORSKI; KENNEDY ERIC, 1998). Além do teste

prático, análises foram realizadas para validação da incorporação dos sais, incluindo a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a análise por Cromatografia Gasosa com detecção por Descarga de Barreira (GC-BID).

## 2. Desenvolvimento

A análise por MEV permitiu a comparação da estrutura interna das LECAs antes e após o processo de modificação. Os resultados são mostrados na Figura 02, que mostra as LECAs antes, com poros vazios, e depois, com os sais depositados no seu interior, o que prova a eficácia do processo de incorporação.

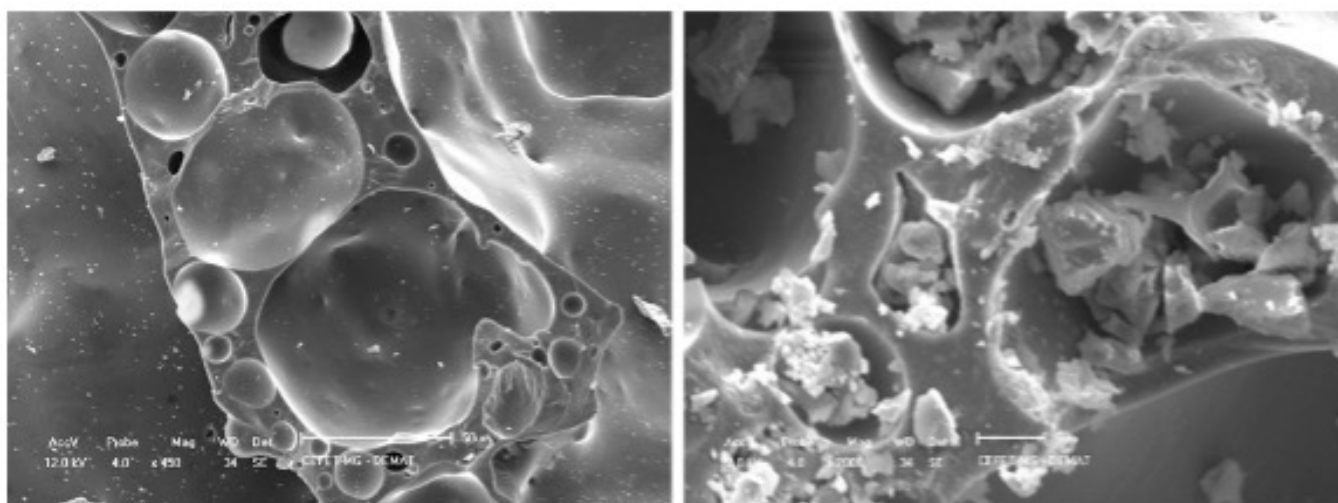


Figura 02. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura obtidas das amostras de LECAs. À esquerda, antes de passar pelo processo de modificação, com uma visão clara dos poros vazios. À direita, após o processo, com a estrutura interna com os sais depositados no seu interior.

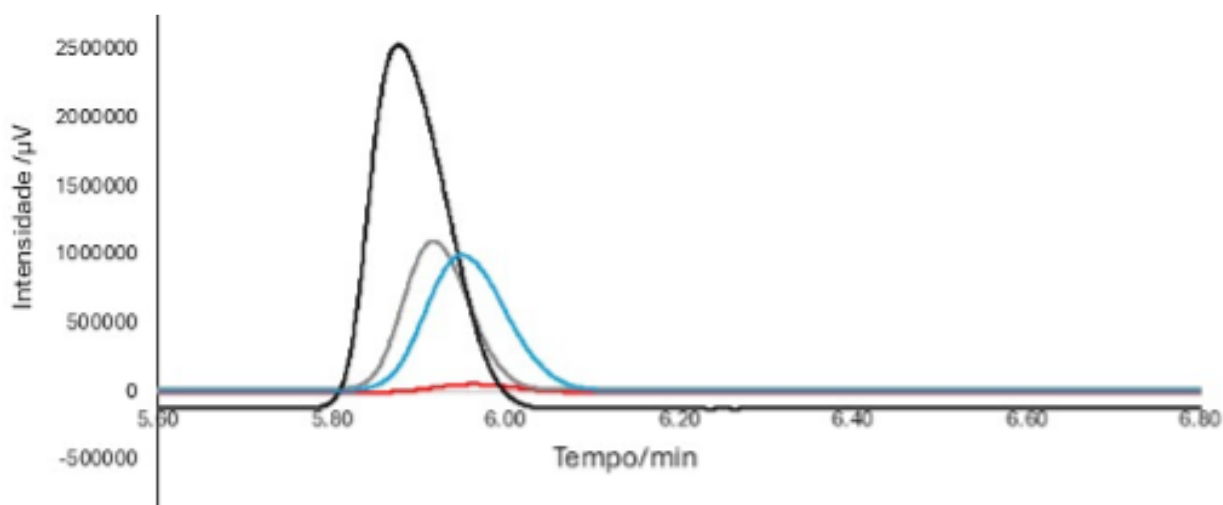


Figura 03. Cromatogramas do branco (LECA antes do processo), em vermelho, sobreposto com cromatogramas em duas concentrações diferentes de padrões de carbonato de sódio. E, em azul, um cromatograma obtido de uma amostra de LECa-modificada.

Os resultados do teste de campo corroboram com os dados obtidos nas análises anteriores, conforme apresentado nas Figuras 04 e 05. A primeira, Figura 04, mostra a caixa antes e depois da colocação dos LECAs- *modificadas* no fundo, bem como o fogo iniciado nos fios que saem da abertura da caixa, que, em cenários reais, são os principais alvos de atividades criminosas.

Após os 15 minutos de teste de fogo, a Figura 05 mostra a abertura da caixa e, à direita, a inspeção manual dos componentes internos e sua temperatura. Ao abrir a caixa, uma grande quantidade de fumaça foi liberada; entretanto, tanto a integridade dos componentes quanto sua temperatura interna foram confirmadas, permanecendo os componentes resfriados em comparação à temperatura externa. Preservar os componentes internos é crucial, pois garante a operação contínua da caixa blindada. O operador de campo precisa apenas verificar a continuidade da comunicação entre os módulos e o sistema central, normalizar as operações e, em seguida, substituir o lote utilizado de LECAs- *modificadas*.



*Figura 04. Registros do teste de campo. À esquerda, a caixa de energia blindada antes e depois do posicionamento das LECAs-modificas. À direita, fogo controlado na caixa teste.*





*Figura 05. Registros do teste de campo. À esquerda, a caixa após o incêndio controlado aberta. À direita, a conferência manual pelo técnico da integridade dos componentes e temperatura interna.*

### 3. Conclusão

A validação da incorporação de sais nas LECAs foi alcançada com sucesso utilizando as técnicas analíticas selecionadas. Pesquisas futuras devem explorar o uso de composições de carbonatos para obter diferentes perfis de liberação de CO<sub>2</sub> durante eventos de incêndio. Estudos em progresso estão investigando o potencial de reutilização de suportes à base de argila e examinando como o tamanho e a área superficial desses materiais influenciam a eficiência na absorção da solução salina. Apesar de estar na fase inicial de testes, o material demonstra um potencial significativo devido ao seu baixo custo de produção e versatilidade em aplicações de supressão de fogo. Uma nova funcionalidade das LECAs-modificadas está atualmente em avaliação. Além disso, o método de produção mostra potencial para adaptação a outros materiais com sistemas de aplicação semelhantes.

### 4. Referências bibliográficas

ADHIKARY, S. K.; ASHISH, D. K. Turning waste expanded polystyrene into lightweight aggregate: Towards sustainable construction industry. **Science of the Total Environment**, v. 837, 1 set. 2022.

BAKIRTZIS, D. et al. Fire retardancy impact of sodium bicarbonate on ligno-cellulosic materials. **Thermochimica Acta**, v. 486, n. 1–2, p. 11–19, 20 mar. 2009.

BASAK, S. et al. Flame resistant cellulosic substrate using banana pseudostem sap. **Polish Journal of Chemical Technology**, v. 17, n. 1, p. 123–133, 1 mar. 2015.

BASAK, S. et al. Green fire retardant finishing and combined dyeing of proteinous wool fabric. **Coloration Technology**, v. 132, n. 2, p. 135–143, 1 abr. 2016.

BAYOUSSEF, A. et al. Use of clays by-products from phosphate mines for the manufacture of sustainable lightweight aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, 20 jan. 2021.

BURBANO-GARCIA, C. et al. Utilization of waste engine oil for expanded clay aggregate production and assessment of its influence on lightweight concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 273, 1 mar. 2021.

CAO, X. et al. Suppression of methane/air explosion by ultrafine water mist containing sodium chloride additive. **Journal of Hazardous Materials**, v. 285, p. 311–318, 1 mar. 2015.

CHAI, G. et al. Experimental study on the effect of dry water materials on the fire extinguishing efficiency and suppression mechanism of wood crib fire. **Fire and Materials**, v. 48, n. 4, p. 469–482, 1 jun. 2024.

CHELLIAH, H. K. et al. **COMPARSION OF THE FIRE SUPPRESSION EFFECTIVENESS OF SODIUM BICARBONAE PARTICLES AND FINE-WAER DROPLETS IN NON-PREMIXED AND PREMIXED FLAMES**. Halon Options Technical Working Conference. **Anais...**2000.

CHEN, X. et al. Effect of dust explosion suppression by sodium bicarbonate with different granulometric distribution. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 49, p. 905–911, 1 set. 2017.

CHEN, X. et al. Renewable biomass gel reinforced core-shell dry water material as novel fire extinguishing agent. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 59, p. 14–22, 1 maio 2019.

FAN, R. et al. Investigation of the physical and chemical effects of fire suppression powder  $\text{NaHCO}_3$  addition on methane-air flames. **Fuel**, v. 257, 1 dez. 2019.

FAN, R.; JIANG, Y.; JIANG, H. Experimental and theoretical investigation of dry-water containing phosphoric acid for new fire suppressant. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 70, 1 maio 2021.

GUO, H. et al. Bioinspired Struvite Mineralization for Fire-Resistant Wood. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 11, n. 5, p. 5427–5434, 6 fev. 2019.

HAMINS, A. **FLAME EXTINCTION BY SODIUM BICARBONATE POWDER IN A CUP BURNER**. Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute. **Anais...**1998.

HERTZBERG, M. et al. **INHIBITION AND EXTINCTION OF EXPLOSIONS IN HETEROGENEOUS MIXTURES**. Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute. **Anais...**Pittsburgh: 1984.

JAHA, S. et al. Production of lightweight expanded aggregates from smectite clay, palygorskite-rich sediment and phosphate sludge. **Clay Minerals**, v. 59, n. 2, p. 85–99, jun. 2024.

JIANG, Z.; CHOW, W. K.; LI, S. F. **Review on additives for new clean fire suppressants. Environmental Engineering Science**, 2007.

KIM, A. H. et al. More than a fertilizer: Wastewater-derived struvite as a high value, sustainable fire retardant. **Green Chemistry**, v. 23, n. 12, p. 4510–4523, 21 jun. 2021.

KORDYLEWSKI, W.; AMROGOWICZ, J. Comparison of  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  Effectiveness as Dust Explosion Suppressants. **COMBUSTION AND FLAME**, v. 90, p. 344–345, 1992.

KOROBENICHEV, O. P. et al. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology. **Fire Safety Journal**, v. 51, p. 102–109, 2012.

KOSHIBA, Y.; HIRAKAWA, Y. Fire-suppression efficiency and extinguishing mechanisms of calcium acetate using heptane cup-burner flames. **Fire and Materials**, v. 47, n. 7, p. 949–958, 1 nov. 2023.

LEHMAN, R. L.; GENTRY, J. S.; GLUMAC, N. G. Thermal stability of potassium carbonate near its melting point. **Thermochimica Acta**, n. 316, p. 1–9, 1998.

LI, G. et al. **Hydrogel Extinguishants. Nanomaterials** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 jul. 2024.

MOSTASHARI, S. M. et al. Thermogravimetric analysis of a cellulosic fabric incorporated by synthetic ammonium magnesium phosphate as a flame-retardant. **Polymer - Plastics Technology and Engineering**, v. 47, n. 3, p. 307–312, mar. 2008.

NI, X. et al. Experimental study on the performance of transition metal ions modified zeolite particles in suppressing methane/air coflowing flame on cup burner. **Journal of Fire Sciences**, v. 32, n. 5, p. 417–430, 1 set. 2014.

RAJPUT, S.; SAIKIA, P. P. Fire extinguishing agents: sort and comparison. **Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol**, v. 6, p. 557–567, 2018.

SANTOS, P. DE S. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**. 2a ed. [s.l.: s.n.]. v. 1

SENECAL, J. A. Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases. **Fire Safety Journal**, v. 40, n. 6, p. 579–591, 2005.

SHILLING, H.; DLUGOGORSKI, B. Z.; KENNEDY ERIC. Extinction of diffusion flames by ultrafine water mist doped with metal chlorides. 1998.

SHMAKOV, A. G. et al. Testing Organophosphorus, Organofluorine, and Metal-Containing Compounds and Solid-Propellant Gas-Generating Compositions Doped with Phosphorus-Containing Additives as Effective Fire Suppressants. **Translated from Fizika Goreniya i Vzryva**, v. 42, n. 6, p. 64–73, 2006.



TAPSCOTT, R. E. et al. **Alternative Fire Suppressant Chemicals: A Research Review with Recommendations**. [s.l.: s.n.].

WANG, Q. et al. Fire extinguishing performance and mechanism for several typical dry water extinguishing agents. **RSC Advances**, v. 11, n. 17, p. 9827–9836, 1 mar. 2021.

YETILMEZSOY, K. et al. *Utilization of struvite recovered from high-strength ammonium-containing simulated wastewater as slow-release fertilizer and fire-retardant barrier. Environmental Technology (United Kingdom), v. 41, n. 2, p. 153–170, 15 jan. 2020.*