

O IMPACTO DAS BATERIAS AUTOMOTIVAS COMO FONTE DE IGNição EM INCêNDIOS

Wanderlei Sena Nuvem¹
<http://orcid.org/0000->

RESUMO

Esta pesquisa se dedica a examinar como incêndios em veículos podem ser desencadeados por problemas nas fontes de energia, focando nas baterias de chumbo-ácido comuns em veículos automotores. O estudo combina duas frentes: uma análise detalhada do que já se sabe sobre as principais tecnologias de baterias (chumbo-ácido, íon-lítio e fosfato de ferro-lítio) e o estudo aprofundado de um caso real de incêndio, sob a perspectiva da perícia técnica. A forma como o estudo foi conduzido segue as orientações da NFPA 921:2021 e da ABNT NBR 15914:2018, complementadas por um estudo técnico oficial da Polícia Federal, utilizando inspeção visual organizada, análise termoquímica de resíduos e a relação entre danos mecânicos, elétricos e térmicos. Os resultados mostraram que a combinação de um curto-círcuito interno, o acúmulo de sulfato nas placas da bateria e a falta de uma fixação mecânica adequada aumentou as vibrações, a deterioração química e o acúmulo de gases inflamáveis em um espaço fechado, levando à ignição e rápida expansão do fogo. Do ponto de vista da química e da física, ficou claro que a sobrecarga e o superaquecimento levaram à quebra da água do eletrólito, liberando hidrogênio em níveis próximos ao mínimo necessário para pegar fogo, aumentando o risco de explosão. A conclusão é que a manutenção adequada, a fixação segura das baterias e o respeito às normas técnicas são essenciais para evitar incêndios causados por fontes de energia em veículos, além de oferecerem bases sólidas para o trabalho de perícia em investigações de incêndios veiculares.

Palavras-chave: Incêndio automotivo; Sulfatação; Baterias chumbo-ácido.

¹Perito de Incêndio Automotivo – Certificação ABINVI – CORPO DE BOMBEIROS – ES ²Pós Graduado e técnico em química Forense – CRQ 024022665.³ graduado no curso de Direito, Instrutor de Técnico de Trânsito DETRAN MG RG: 268/02 livro 193 fl. 02, Pós-graduado em Criminalística, Pós-graduado em Trânsito / Transportes, Pós-graduado Engenharia Automotiva, Pós-graduado em Química Forense, Técnico em Química CRQ II 024022665, Técnico em Mecânica e Eletrotécnica CRT II MG RG: 74560484600, Técnico em bateria nível I e II - Bosch, Laboratório Test Mat de Análise de Falhas e Deformações de Material Ferrosos, não Ferroso, Confiabilidade de Equipamento e Produtos, Metalografia e Identificação e Procedência Veicular DECKA e SENASP – Ministério da Justiça MJ - membro da ABCCRIM – Academia Brasileira De Ciências Criminais com função técnica de Perito Criminalista Forense / membro do Instituição IAAI – International Association Of Arson Investigators – Associação Internacional de Investigadores de ARSON registro nº 1405179 / NAFI - National Association of Fire Investigators registro - Number: 26200 - VIDE, Especialista em micro vestígios, Perícia de Incêndio em Edificações, Química Forense – Armas Químicas e Explosivos, GASES - Produção, transporte e utilização na indústria, laboratórios e medicina, Análise Química Instrumental - Princípios e Cotidiano Profissional. Química Forense: técnicas de revelação de impressões digitais

THE IMPACT OF AUTOMOTIVE BATTERIES AS A SOURCE OF IGNITION IN FIRES

ABSTRACT

This research examines how vehicle fires can be triggered by problems in power sources, focusing on lead-acid batteries common in automotive vehicles. The study combines two approaches: a detailed analysis of what is already known about the main battery technologies (lead-acid, lithium-ion, and lithium iron phosphate) and an in-depth study of a real fire case from a technical expertise perspective. The study was conducted following the guidelines of NFPA 921:2021 and ABNT NBR 15914:2018, complemented by an official technical study from the Federal Police, using organized visual inspection, thermochemical analysis of residues, and the relationship between mechanical, electrical, and thermal damage. The results showed that the combination of an internal short circuit, sulfate buildup on the battery plates, and the lack of proper mechanical fastening increased vibrations, chemical interaction, and the accumulation of flammable gases in an enclosed space, causing ignition and rapid fire spread. From a chemical and physics standpoint, it became clear that overloading and overheating caused the electrolyte water to break down, releasing moisture at levels close to the minimum necessary to generate fire, increasing the risk of explosion. The conclusion is that proper maintenance, secure battery mounting, and adherence to technical standards are essential to prevent fires caused by energy sources in vehicles, as well as providing a solid basis for forensic work in vehicle fire investigations.

Keywords: Car fire; Sulphation; Lead-acid batteries.

Artigo Recebido em 15/05/2025

Aceito em 18/12/2025

Publicado em 30/12/2025

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização de eletricidade nos automóveis tem aumentado a relevância das fontes de energia, especialmente as baterias recarregáveis, como as de chumbo-ácido, íons de lítio e fosfato de ferro-lítio (LFP). Além de alimentarem sistemas como ignição, injeção eletrônica, iluminação e segurança, esses componentes são cruciais, e sua deterioração ou defeito pode ser a causa de incêndios em veículos. Do ponto de vista químico, o funcionamento das baterias envolve reações de oxirredução que liberam muito calor. A instabilidade térmica, a sobrecarga e os curtos-circuitos podem gerar gases e liberar substâncias inflamáveis, como hidrogênio e oxigênio, aumentando o risco de combustão ou explosão em espaços fechados.

Estudos oficiais, incluindo análises da Polícia Federal, mostram que as baterias de chumbo-ácido funcionam pela interação entre o dióxido de chumbo (PbO_2) e o chumbo metálico (Pb) em ácido sulfúrico diluído, formando um sistema eletroquímico muito sensível a mudanças de tensão e temperatura. Quando a tensão ultrapassa 2,45 V por célula, ocorre a quebra da água, liberando hidrogênio, cuja concentração mínima para inflamar (4% no ar) representa um risco real de explosão. Essa situação piora em casos de curto-circuito, isolamento ruim ou falta de manutenção, podendo causar um aumento repentino da pressão interna e o rompimento da bateria, com projeção de ácido e material em brasa.

Assim, entender os processos físicos, químicos e térmicos que controlam o comportamento das baterias de carros é fundamental para investigar incêndios e explosões em veículos. Este artigo apresenta uma análise organizada dos principais fatores que podem causar incêndios relacionados às baterias de carros, relacionando dados práticos com normas técnicas, como a NFPA 921 e a ABNT NBR 15914/2018. Além disso, o objetivo é discutir métodos de perícia para diagnosticar falhas de energia e mostrar um

caso que exemplifica a importância de combinar conhecimentos de engenharia elétrica, química forense e análise de materiais para evitar acidentes.

Perante tal contexto, o propósito deste estudo é oferecer uma avaliação aprofundada e metódica acerca dos elementos cruciais que fazem com que as baterias de veículos se tornem causas de incêndio.

Serão examinados erros de utilização, propriedades da física e da química, técnicas de perícia seguindo padrões como a NFPA 921, a ABNT NBR 15914:2018 e o Estudo Técnico – Baterias Chumbo-ácido – SEPLOC/DPEMAP/INC/DITEC/PF (Polícia Federal), bem como a análise de um caso prático que demonstra o valor de avaliações exatas na proteção contra incêndios em veículos.

2 METODOLOGIA

A condução desta análise técnica fundamentou-se em um modelo investigativo de natureza qualitativa, aplicada e descriptiva. A abordagem utilizou como alicerce os princípios do método científico recomendados pela NFPA 921 (Guia para Investigação de Incêndios e Explosões), aliados à norma ABNT NBR 15914/2018, que rege a instalação e os parâmetros de segurança de baterias automotivas do tipo chumbo-ácido. O caráter descriptivo da pesquisa justifica-se pela necessidade de detalhar as características do fenômeno observado, com foco na análise pericial de incêndio automotivo envolvendo acumuladores de energia e na identificação das causas de ignição associadas a falhas estruturais e eletroquímicas.

Os procedimentos metodológicos contemplaram a observação técnica direta e detalhada de componentes danificados, tanto internos quanto externos da bateria, incluindo polos (ânodo e cátodo), vasos, placas internas, conectores e elementos estruturais da carcaça. Foram verificados e descritos indícios físicos como oxidação, derretimentos, deformações por calor, presença de

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

resíduos cristalizados (sulfato de chumbo) e danos compatíveis com curto-circuito, elementos essenciais para a formulação das hipóteses técnicas.

O delineamento adotado foi o estudo de caso, tomando como base prática um veículo automotor que apresentou ignição espontânea de origem térmica, com foco inicial na região da bateria. Adotou-se uma abordagem sistêmica que incluiu: inspeções visuais macroscópicas, identificação de focos de calor, exame das condições das fiações calibrosas e verificação da integridade das conexões entre as células. Paralelamente, realizou-se a coleta de evidências físicas do local e do acumulador, incluindo resíduos eletroquímicos, para a compor a análise descritiva.

Os parâmetros de diagnóstico utilizados incluíram critérios:

Visuais: Manchas, estufamentos, furos e vazamentos;

Elétricos: Vestígios de sobrecarga e sinais de interrupção de circuito;

Químicos: Presença de material cristalizado, odor característico de gases liberados e indícios de eletrólise avançada.

Esses dados foram organizados e interpretados à luz da literatura técnica, normas reguladoras e manuais de fabricantes. Essa metodologia permitiu traçar um panorama coerente das possíveis causas de ignição, correlacionando fatores como manutenção inadequada, falhas de instalação, desgaste por vibração e ausência de dispositivos de travamento, reforçando a importância da análise técnica como ferramenta preventiva em segurança veicular.

3DESENVOLVIMENTO

3.1Tipos de Baterias Automotivas (Li-ion, LFP, Chumbo-Ácido)

O avanço tecnológico e a diversificação das aplicações energéticas no setor automotivo impulsionaram a utilização de diferentes tipos de baterias,

cada uma com características eletroquímicas, estruturais e operacionais específicas. As três principais categorias empregadas atualmente são as baterias de íon-lítio (Li-ion), as de fosfato de ferro-lítio (LFP) e as tradicionais baterias de chumbo-ácido, cada uma adaptada a diferentes exigências de desempenho, segurança e custo-benefício. Segundo Linden e Reddy (2002), as baterias de chumbo-ácido mantêm-se como o padrão mais utilizado em veículos de combustão interna devido ao seu baixo custo de produção, confiabilidade mecânica, elevada capacidade de descarga e facilidade de reaproveitamento de componentes.

Apesar de sua popularidade, as baterias de chumbo-ácido apresentam limitações significativas, como maior peso, degradação acelerada em ambientes de altas temperaturas e necessidade de manutenção frequente. Ramos (2023) afirma que a robustez estrutural dessas baterias não elimina os riscos associados à liberação de hidrogênio durante o processo de carga, o que pode resultar em explosões se não houver ventilação adequada. A vibração constante, o excesso de carga e o envelhecimento químico agravam a possibilidade de falhas eletrotérmicas, tornando essencial o cumprimento das normas de instalação e inspeção periódica.

Com o crescimento da eletrificação veicular e a busca por soluções mais eficientes, as baterias de íon-lítio passaram a ocupar um papel central em veículos híbridos e elétricos. Esse tipo de bateria se destaca por apresentar densidade energética superior, maior autonomia e peso reduzido, fatores que ampliam a eficiência energética dos sistemas embarcados. No entanto, a maior complexidade do seu gerenciamento térmico, aliada à instabilidade dos componentes eletrolíticos em caso de dano físico, torna as baterias Li-ion mais suscetíveis a falhas catastróficas por *thermal runaway*, exigindo sistemas de monitoramento integrados (Akinyele et al., 2015 p. 08).

A tecnologia de fosfato de ferro-lítio (LFP), por sua vez, vem se consolidando como uma alternativa segura dentro do segmento de veículos elétricos, especialmente em aplicações que demandam maior estabilidade

térmica e maior resistência a ciclos profundos de descarga. Segundo Cunha e Oliveira (2019), baterias LFP apresentam menores riscos de combustão espontânea devido à sua composição química estável, sendo mais tolerantes a sobrecargas e com vida útil estendida, embora tenham densidade energética ligeiramente inferior quando comparadas às Li-ion convencionais.

Cada tecnologia apresenta exigências operacionais e protocolos de manutenção distintos, o que torna o diagnóstico e a prevenção de falhas altamente dependentes da identificação correta do tipo de acumulador instalado. De acordo com a Tudor (2019), essa diversidade impõe ao setor automotivo o desafio de aplicar diagnósticos específicos e procedimentos diferenciados para inspeção, testes e substituição, evitando a aplicação inadequada de técnicas universais que podem comprometer a segurança do sistema como um todo.

3.2 Características Físico-Químicas Envolvidas nos Riscos

O funcionamento das baterias automotivas baseia-se em reações eletroquímicas complexas, as quais, quando submetidas a condições adversas de operação, podem desencadear processos térmicos e químicos de alta periculosidade. Tais processos incluem superaquecimento localizado, degradação de materiais ativos, liberação de gases inflamáveis e, em casos extremos, ignição espontânea com potencial de propagação para outras partes do veículo. Segundo Stauffer et al. (2008), os materiais eletroativos utilizados no interior das baterias, como o dióxido de chumbo e o chumbo metálico, apresentam comportamento altamente exotérmico em situações de curto-circuito, o que eleva significativamente a temperatura interna e favorece a combustão do eletrólito e dos materiais poliméricos adjacentes.

Para Costa (2021), um dos fatores mais críticos nesse processo é a decomposição térmica do eletrólito ácido, particularmente nas baterias de

chumbo-ácido. Quando submetidas a tensões superiores a 2,45 volts por célula, inicia-se o processo de eletrólise da solução de ácido sulfúrico, resultando na produção de hidrogênio e oxigênio gasosos, ambos altamente reativos e inflamáveis. Se esses gases forem confinados sem a devida ventilação, a elevação da pressão interna pode comprometer a estrutura física da bateria, levando à ruptura violenta de sua carcaça plástica, fenômeno comumente observado em falhas de sobrecarga prolongada.

Linden e Reddy (2002) explicam que, do ponto de vista estrutural, as baterias automotivas consistem em eletrodos de polaridades opostas (PbO_2 na placa positiva e Pb esponjoso na negativa), imersos em uma solução eletrolítica de H_2SO_4 . Esse arranjo químico gera uma tensão nominal de 12V nas baterias mais comuns, porém, sua estabilidade depende da integridade física dos separadores internos, responsáveis por isolar as placas e evitar curtos-circuitos diretos. A falha nesse isolamento, provocada por impactos, vibração excessiva ou degradação por envelhecimento, cria uma ponte condutora que interrompe o ciclo eletroquímico controlado, desencadeando calor excessivo e ignição potencial.

A cristalização do sulfato de chumbo ($PbSO_4$), conhecida como sulfatação, representa um dos principais fatores físico-químicos de degradação do sistema, especialmente em baterias submetidas a ciclos incompletos de carga ou longos períodos de inatividade. Essa cristalização compromete a capacidade de armazenar energia e contribui para o acúmulo de calor durante tentativas de recarga, criando um cenário propício à liberação térmica descontrolada, inclusive em baterias estacionárias ou de baixa rotação (Luffe, 2025 p. 03).

No caso das baterias de íon-lítio, a natureza dos riscos se intensifica devido à instabilidade térmica dos eletrólitos orgânicos e dos materiais ativos das células. Segundo Santos e Gomes (2020), quando danificadas mecanicamente ou expostas a cargas elevadas, essas baterias podem liberar oxigênio de forma acelerada, desencadeando o fenômeno conhecido como *thermal runaway* — uma reação em cadeia onde o calor gerado intensifica as

reações químicas internas, levando à ignição espontânea e, muitas vezes, à explosão. Esse processo pode ocorrer mesmo horas após o encerramento da carga ou após o resfriamento superficial da bateria.

Tudor (2025) complementa que a sulfatação das placas, fenômeno mais comum em baterias chumbo-ácido, reduz progressivamente a condutividade elétrica interna. Com o aumento da resistência ôhmica, a tensão de trabalho é desviada para a dissipação de calor, o que pode levar à formação de gases e à deformação da estrutura interna. A sobrecarga torna-se inevitável, comprometendo não apenas a vida útil da bateria, mas também a segurança operacional do veículo, sobretudo em ambientes fechados ou de alta temperatura externa.

4 NORMAS TÉCNICAS (ABNT, NFPA 921)

O processo investigativo e preventivo relacionado a incêndios em baterias automotivas deve seguir protocolos rigorosos definidos por normas nacionais e internacionais. Segundo a NFPA (2021), a investigação de incêndios deve adotar o método científico, com análise sistemática da origem do fogo, dos materiais combustíveis e das possíveis fontes de ignição.

Para a ABNT (2018), a norma NBR 15914 específicas critérios técnicos para a instalação adequada de baterias chumbo-ácido em veículos automotores, incluindo aspectos como ventilação, fixação, proteção contra vibrações e precauções elétricas.

De acordo com Stauffer et al. (2008), o cumprimento rigoroso dessas normas é essencial para assegurar a integridade dos sistemas elétricos veiculares e prevenir falhas que possam culminar em incêndios.

Costa (2021) explica que as normas servem também como base para a emissão de laudos periciais, oferecendo parâmetros de comparação técnica

entre o que é considerado falha de fabricação, uso indevido ou falta de manutenção.

Segundo Ramos (2023), as diretrizes da NFPA 921 orientam não apenas investigações de incêndios estruturais, mas também aquelas envolvendo veículos, considerando fatores como propagação térmica, análise de resíduos e coleta de vestígios.

Santos e Gomes (2020) destacam que a aplicação das normas é fundamental também para fabricantes e oficinas, pois garante padrões mínimos de segurança e previne acidentes decorrentes da instalação inadequada de componentes energéticos.

5 FALHAS COMUNS EM BATERIAS AUTOMOTIVAS

As baterias automotivas, especialmente do tipo chumbo-ácido, estão sujeitas a uma série de falhas que comprometem seu desempenho e segurança. Entre os problemas mais recorrentes, destaca-se a sulfatação das placas internas, processo em que cristais de sulfato de chumbo ($PbSO_4$) se formam e aderem às superfícies condutoras, dificultando a reversibilidade eletroquímica e reduzindo significativamente a capacidade de carga. Segundo Linden e Reddy (2002), esse fenômeno se agrava quando a bateria permanece por longos períodos sem recarga ou é submetida a ciclos incompletos de carga, tornando o sistema propenso ao superaquecimento durante a operação.

Outra falha crítica envolve o curto-círcito interno, geralmente causado por degradação dos separadores entre as placas ou por acúmulo de material condutivo no fundo dos vasos. Conforme Costa (2021), essas falhas geram corrente descontrolada, aumento súbito de temperatura e liberação de gases inflamáveis, como o hidrogênio, criando um ambiente altamente propenso à ignição espontânea. A continuidade do uso em tais condições pode levar à

Revista FLAMMAE

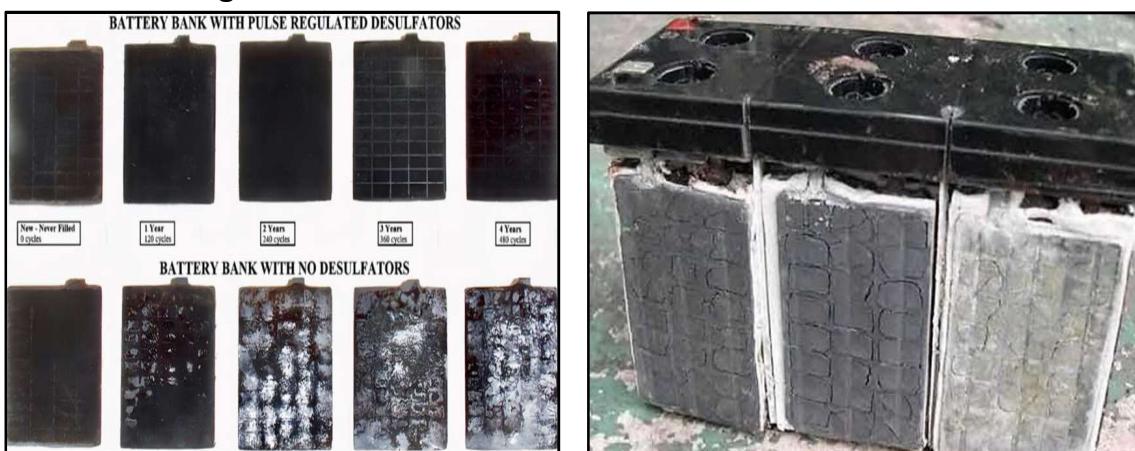
Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

explosão da bateria ou ao início de focos de incêndio nos compartimentos próximos.

Figuras 1 e 2 – Danos em baterias automotivas



Fonte: <https://www.researchgate.net/profile/> (2025) Fonte: <https://www.fastbatt.net>

Dos danos típicos em baterias automotivas, como placas deformadas, curto-círcito interno e marcas de superaquecimento, conforme destacados por fabricantes e manuais técnicos especializados.

A oxidação dos polos e conexões também constitui uma falha comum e silenciosa. A presença de umidade e a má vedação dos terminais aceleram processos corrosivos que elevam a resistência elétrica nos contatos, provocando perda de eficiência e geração localizada de calor, fator determinante para o desenvolvimento de pontos quentes. Esse aquecimento pode, inclusive, comprometer a integridade dos cabos de alimentação e causar derretimentos de revestimentos isolantes (Cunha e Oliveira, 2019 p. 02).

A expansão da carcaça é outro sinal de falha operacional grave. Em situações de sobrecarga ou falha no sistema regulador de tensão do alternador, ocorre a eletrólise exagerada do eletrólito, acumulando hidrogênio no interior do invólucro. Ramos (2023) ressalta que a ausência de ventilação adequada ou de válvula de alívio em baterias seladas agrava esse quadro, resultando em deformações físicas que indicam risco iminente de explosão.

A instalação incorreta ou ausência de travamento da bateria contribui significativamente para falhas mecânicas. A vibração contínua e os impactos durante o uso veicular causam desgaste por atrito entre os componentes internos, rompimento das conexões intercelulares e microfissuras na caixa plástica. Segundo a ABNT NBR 14482(2017) item 2.2, o suporte fixador é essencial para garantir a estabilidade do acumulador de energia e sua ausência compromete a função estrutural da bateria, aumentando os riscos de curto-circuito e vazamento de eletrólito em ambientes críticos.

6 MECANISMOS DE IGNIÇÃO E PROPAGAÇÃO DO FOGO

O processo de ignição em baterias automotivas é um fenômeno termoquímico complexo, que envolve múltiplas variáveis físicas e eletroquímicas. Um dos principais gatilhos identificados em investigações periciais é o curto-circuito interno, em que o contato direto entre placas de polaridade oposta, provocado por falha nos separadores ou por acúmulo de material condutivo, gera uma corrente de alta intensidade. Segundo Stauffer et al. (2008), essa corrente promove aquecimento súbito das células, resultando na vaporização do eletrólito e na liberação de gases inflamáveis como hidrogênio e oxigênio, criando o ambiente ideal para a combustão espontânea.

Para Costa (2021), a ignição pode ser potencializada quando a bateria é submetida a ciclos de sobrecarga, ultrapassando os limites de tensão estipulados pelos fabricantes. Quando a tensão ultrapassa 2,45V por célula, inicia-se a eletrólise do eletrólito ácido, produzindo bolhas de hidrogênio que, se confinadas em baterias seladas sem escape adequado, elevam a pressão interna a níveis perigosos. A fagulha gerada por conexões frouxas, faíscas do motor de partida ou mesmo o calor residual do compartimento do motor pode então atuar como agente deflagrador.

Além disso, as falhas térmicas têm papel decisivo na propagação do fogo após a ignição inicial. Ramos (2023) afirma que a presença de materiais combustíveis no entorno da bateria, como isolantes acústicos, forrações do capô ou resíduos de óleo no compartimento do motor, contribuem para a rápida expansão do foco de incêndio. O calor gerado por reações exotérmicas internas atinge temperaturas superiores a 400 °C, fundindo componentes plásticos e derretendo cabos de alimentação, o que facilita a migração das chamas para outras partes do veículo.

Figura 3 - Incêndio em bateria veicular



Fonte: Imagem (2021) clickpetroleo e gas

Ilustra a propagação do fogo em ambientes confinados, evidenciando como o incêndio pode evoluir a partir de uma ignição localizada na bateria automotiva.

Figura 04 –Evolução do incêndio em bateria de veicular



Fonte: autor (2025)

A evolução do incêndio representada na imagem segue os princípios técnicos da curva de desenvolvimento do fogo amplamente utilizada em engenharia de segurança contra incêndio e perícias de incêndios. A referência técnica mais reconhecida para esse modelo é a NFPA 921 – Guide for Fire and Explosion Investigations, da National Fire Protection Association (EUA), que descreve as quatro fases do incêndio:

1. **Fase Inicial** (Ignition) – Início da combustão com liberação de calor localizada.
 2. **Fase de Crescimento** (Growth) Expansão do fogo com aumento progressivo da temperatura e envolvimento de mais materiais combustíveis.
 3. **Desenvolvimento Pleno** (FullyDeveloped Fire) – Máxima liberação de calor; o ambiente atinge temperatura elevada em todos os pontos (flashover geralmente ocorre aqui).
 4. **Fase de Decadência** (Decay) Consumo dos combustíveis disponíveis, resultando na redução da intensidade e temperatura do fogo.
- Esses conceitos também são abordados em normas complementares, como:
5. ISO 13571 "Life-threatening components of fire Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires"
 6. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Publicado pela Society of Fire Protection Engineers

6.1 Interpretação concisa do desenvolvimento do fogo

6.1.2 Estágio Primário (Início)

No Gráfico: A linha vermelha se encontra na base, sinalizando temperatura ambiente ou um pouco acima.

Visual: O fogo se limita a um ponto restrito. Observa-se fumaça clara ou branca saindo do capô (queima completa), com pouca ou nenhuma chama visível do lado de fora. O oxigênio é farto, mas o calor ainda é pequeno.

6.1.3 Estágio de Expansão

No Gráfico: A linha vermelha começa a subir abruptamente. A temperatura se eleva com rapidez.

Visual: A fumaça se torna mais espessa e escura (apontando para combustão incompleta e materiais sintéticos em chamas). As chamas começam a se alastrar do foco inicial para o resto do carro. O calor irradia e aquece os materiais próximos, preparando-os para a ignição.

6.1.4 Envolvimento Total (Incêndio Completo)

No Gráfico: A curva alcança seu ápice (ponto mais elevado).

Visual: O carro é completamente consumido pelas chamas. O fogo atinge sua temperatura máxima e todos os materiais inflamáveis disponíveis estão queimando ao mesmo tempo. Este é o momento mais crítico e arriscado, onde ocorre a maior liberação de calor.

6.1.5 Declínio (Extinção)

No Gráfico: A linha vermelha começa a decrescer.

Visual: Apesar da imagem mostrar o fogo alto, a fase de declínio (lado direito do gráfico) aponta para o momento em que o combustível (os materiais

do carro: plástico, estofado, combustível líquido) começa a acabar. A força das chamas diminui aos poucos e a temperatura cai, restando apenas brasas ou focos isolados até que o fogo se apague.

6.1.6 Síntese do Gráfico

A imagem tem como objetivo demonstrar que o tempo de reação em um incêndio de carro é curto. A passagem da fase inicial para o envolvimento total pode acontecer em poucos minutos, elevando a temperatura de níveis seguros para fatais muito depressa.

Outro aspecto importante é a natureza dos gases produzidos. Segundo Santos e Gomes (2020), os produtos da decomposição térmica da bateria incluem hidrogênio, oxigênio e óxidos metálicos, altamente reativos e potencialmente explosivos. Em ambientes confinados, como garagens ou túneis, a concentração desses gases pode atingir limites de inflamabilidade em segundos, o que agrava a extensão e severidade da ocorrência.

A propagação do fogo também pode ser acelerada pela falta de dispositivos de contenção, como válvulas de alívio de pressão ou sistemas de ventilação no compartimento do acumulador. De acordo com a ABNT NBR 14482(2017) item 2.2 a instalação adequada da bateria deve prever mecanismos que impeçam o confinamento de gases e o acúmulo de calor, evitando assim a escalada do incidente para um incêndio de grandes proporções. A negligência quanto a essas exigências técnicas é frequentemente observada em veículos modificados ou com manutenção irregular.

7 DIAGNÓSTICO PERICIAL DE CURTO-CIRCUITOS E SULFATAÇÃO

A investigação pericial de baterias automotivas exige metodologia rigorosa e análise sistemática das condições físicas e eletroquímicas do acumulador de energia. O diagnóstico de curto-circuito interno é realizado,

inicialmente, por observação macroscópica de deformações, derretimentos localizados nos vasos ou tampa, manchas escuras de carbonização e vestígios de material fundido. Segundo a NFPA (2021), esse tipo de dano é um dos mais perigosos por ser de rápida evolução, normalmente silencioso até o momento da ignição, e altamente destrutivo.

De acordo com Costa (2021), os indícios técnicos de curto-circuito são reforçados pela análise dos polos cátodos (positivo) e ânodo (negativo), cujas extremidades podem apresentar sinais de fusão, oxidação ou enrijecimento anormal devido ao aquecimento excessivo. O procedimento pericial recomenda desmontagem controlada da bateria, quando possível, para inspecionar a integridade das grades de chumbo e a presença de resíduos condutores entre placas adjacentes, que indicam falha nos separadores ou infiltração de material metálico.

Para avaliar baterias chumbo-ácido, a perícia técnica deve diferenciar precisamente entre problemas mecânico-elétricos (curto-circuito) e a deterioração físico-química (sulfatação). Apesar de ambos levarem à falha do componente, suas causas, comportamento elétrico e aquecimento são totalmente distintos.

A seguir, detalhamos a análise técnica para uma identificação pericial completa.

7.1 Análise Técnica do Curto-Circuito (Falha Elétrica/Mecânica)

O curto-circuito interno acontece quando há um contato físico não intencional entre as placas de polaridades opostas (anodo de Chumbo Esponjoso e catodo de Dióxido de Chumbo) dentro de uma célula.

Base Eletroquímica: Uma bateria automotiva comum tem 6 células, cada uma com cerca de 2,1V, totalizando 12,6V. Um curto elimina a voltagem de uma célula específica, reduzindo a voltagem da bateria para aproximadamente 10,5V (perda de uma célula) ou causando alta descarga espontânea.

7.2 Causas Principais:

Problema no Separador: Ruptura do polietileno microporoso que separa as placas.

Desprendimento de Material Ativo (Lama): Muita vibração ou descargas profundas fazem o material cair no fundo da célula, criando uma ligação condutora (curto no fundo).

Dendritos: Crescimento de estruturas metálicas (fios de chumbo) que furam o separador.

7.3 O que Observar na Perícia (Diagnóstico):

Tensão em Circuito Aberto: A bateria mostra uma tensão estática perto de 10,5V a 10,8V logo após uma carga completa.

Densidade do Eletrólito: Uma célula mostra uma densidade muito baixa (praticamente água), enquanto as outras têm carga normal. O curto usa o ácido daquela célula continuamente.

Comportamento Térmico: Ao tentar recarregar, a célula em curto esquenta muito mais do que as outras e "ferve" (libera muitos gases) rapidamente, por causa da quebra da água pela corrente excessiva no local.

7.4 Análise Técnica da Sulfatação (Falha Química/Cristalográfica)

A sulfatação é a recristalização do Sulfato de Chumbo ($PbSO_4$). Durante a descarga normal, o sulfato é amorfo e pequeno. Na sulfatação prejudicial, ele vira cristais grandes e estáveis, que não conduzem eletricidade.

Base Eletroquímica: O $PbSO_4$ naturalmente não conduz eletricidade. Quando ele cristaliza e cobre a superfície das placas, impede a reação reversível de carga (voltando a ser Pb e PbO_2). Isso aumenta muito a resistência interna da bateria.

7.5 Causas Principais:

Carga Insuficiente Constante: Alternador com voltagem baixa (menos de 13,5V).

Tempo Guardada: Bateria deixada parada com voltagem abaixo de 12,4V por muito tempo.

Separação do Eletrólito: Concentração de ácido desigual que acelera a corrosão na parte inferior das placas.

7.6 Análise Técnica (Constatações):

Tensão Enganosa ao Carregar: Ao plugar o carregador, observa-se um salto "imediato" para 14V ou superior, porém a corrente de carga é praticamente inexistente (o carregador interpreta que a bateria está totalmente carregada, quando na verdade há um bloqueio químico).

Descarregamento Repentino com Demanda: Ao simular uma partida (teste CCA), a tensão despenca quase a zero de forma abrupta, consequência da elevada resistência interna.

Baixa Densidade Generalizada: Ao contrário de um curto, a densidade está reduzida em todas as células, mostrando que o ácido se cristalizou nas placas, impossibilitando seu retorno à solução.

Inspeção Visual (quando possível): Placas exibindo tonalidade esbranquiçada ou depósitos brancos consistentes, destoando da coloração cinza-chumbo/marrom escuro habitual.

Figuras 5 e 6 – Placas de baterias veicular sulfatadas



Fonte: Baterias Bosch

Fonte:<https://quizlet.com/ca/784676024/4b8-steve-exam-2-flash-cards/>

As ilustrações mostram visualmente os sinais típicos de sulfatação e curto-círcito interno em baterias automotivas, conforme discutido anteriormente. Tais evidências visuais são fundamentais para o diagnóstico pericial preciso dessas falhas.

A sulfatação, por sua vez, é diagnosticada por meio da coloração esbranquiçada nas placas, densidade eletrolítica reduzida e baixa reatividade química mesmo após tentativas de recarga. Segundo Linden e Reddy (2002), a presença de cristais de sulfato de chumbo ($PbSO_4$) representa um estágio avançado de degradação, causado por longos períodos de inatividade, sobrecarga sistemática ou funcionamento parcial. Esse tipo de falha compromete a eficiência do sistema e pode levar à ignição indireta por aquecimento localizado durante a recarga.

Para a Luffe (2025), o exame das placas internas pode revelar padrões de cristalização simétrica, indicando sulfatação natural, ou distribuições irregulares e endurecidas, sinalizando falha crítica por descarga profunda e ausência de manutenção. Em ambientes forenses, a identificação da sulfatação costuma ser associada à análise do histórico do veículo, da qualidade do

alternador e do padrão de uso do proprietário, permitindo traçar o nexo causal entre o uso e a degradação do sistema.

Cunha e Oliveira (2019) afirmam que a conjugação de curto-circuito interno com placas sulfatas intensifica a propagação térmica do incêndio, visto que a resistência interna da bateria aumenta exponencialmente, elevando a temperatura em ciclos de recarga e descarga. A perícia, nesse caso, deve integrar dados visuais, elétricos e químicos, aliando inspeção física com o uso de instrumentos de medição e cruzamento de informações técnicas, para consolidar uma conclusão segura quanto à causa da ignição.

8 ESTUDO DE CASO COM ANÁLISE DE FALHAS E IGNição

O caso analisado refere-se a um veículo automotor que apresentou ignição localizada na região da bateria, resultando em incêndio de média proporção com comprometimento do compartimento do motor. A análise pericial foi conduzida seguindo as diretrizes metodológicas da NFPA 921 (2021) e da ABNT NBR 15914:2018, com foco na observação da estrutura física da bateria, fiações calibrosas, bornes, vasos, polos e componentes adjacentes. O objetivo foi identificar a causa determinante da ignição e suas respectivas condições favorecedoras.

Durante a inspeção, constatou-se a ausência do suporte de fixação da bateria, fator que favoreceu deslocamentos contínuos e impactos mecânicos ao longo do uso veicular. Segundo a ABNT (2018), o suporte de travamento é fundamental para evitar deslocamento estrutural do acumulador de energia. A movimentação constante da bateria promoveu atritos, microfissuras e desgastes na base da caixa plástica, além da oxidação e soltura dos polos, condições propícias para formação de arcos elétricos e aquecimento localizado.

Figura 7 - Derretimento dos polos cátodos e ânodo devido a superaquecimento e falha eletroquímica.



Fonte: autor (2025)

Foi evidenciado também o acúmulo de cristais esbranquiçados nos polos e vasos da bateria, indicativo clássico de sulfatação avançada das placas internas. Essa condição comprometeu a condutividade elétrica e elevou a resistência interna, resultando em aquecimento anormal durante ciclos de carga, conforme destacado por Linden e Reddy (2002). Ao analisar a tampa da bateria, foram encontrados furos e deformações térmicas, sinal claro de expansão por gases (hidrogênio e oxigênio) acumulados em virtude de eletrólise interna descontrolada.

Figuras 8 a 11 - Formação de cristais de sulfato

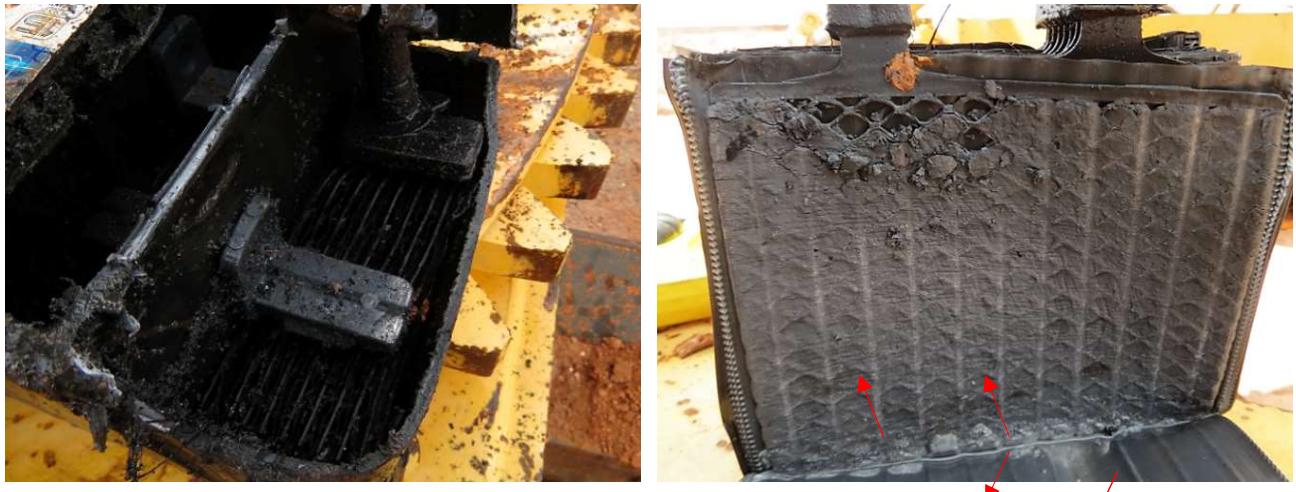


Fonte: autor (2025)

Formação de cristais de sulfato de chumbo em placas internas, indicando sulfatação avançada e curto-circuito.

Os fios de alimentação que partiam da bateria apresentavam derretimento localizado do isolamento, revelando a ocorrência de um curto-circuito progressivo, que serviu como ponto de ignição do evento. Este foco térmico rompeu a barreira isolante, permitindo o contato direto com o material fibroso do forro de proteção do capô, o qual, ao entrar em combustão, facilitou a propagação vertical das chamas para a parte superior do motor. A dissipação térmica intensa contribuiu para o alastramento do fogo, conforme documentado na análise fotográfica e nos resíduos coletados.

Figuras 12 e 13 - Fragmentação da placa negativa de chumbo, o que promove o curto-círcito interno.



Fonte: autor (2025)

Figuras 14 e 15 - Formação de cristais e borra química.



Fonte: autor (2025)

Detalhes como se formam os cristais de sulfato de chumbo ($PbSO_4$) nas placas internas positivas da bateria (dióxido de chumbo). Esse surgimento revela um estágio já avançado do processo de sulfatação, ligado a um curto-círcito interno e também ao depósito de uma substância pastosa / borra de

composição química complexa. Tal material consiste em resíduos originados da deterioração das placas, incluindo sulfato de chumbo ($PbSO_4$), óxido de chumbo (PbO), chumbo metálico (Pb), dióxido de chumbo (PbO_2) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), prevalecendo a cor marrom.

Para Broussely e Archdale (2004), a degradação com o tempo, as baterias de chumbo-ácido sofrem alterações químicas, como a criação de sulfato de chumbo ($PbSO_4$), a diminuição da água, o desgaste dos componentes e o endurecimento do ácido.

Os principais componentes da química borra são:

Chumbo sulfato ($PbSO_4$) é o principal composto formado durante a descarga;

Dióxido de chumbo (PbO_2), a fonte da placa positiva;

Chumbo esponjoso (Pb): a fonte da placa negativa;

Chumbo Óxidos (PbO , PbO_3 , etc.) — subprodutos da oxidação e redução;

Resíduos da eletrólise (H_2SO_4), reagidos ou absorvidos;

Fragmentos do material ativo das placas.

Este material é depositado na parte inferior da bateria e pode causar circuitos internos entre as placas, diminuição da capacidade de carga da bateria, aumento da resistência interna ou até mesmo falhas térmicas ou explosivas se houver ruído excessivo ou movimento brusco da bateria.

Figuras 16 e 17 - Danos por queima interna/ fusão dos cristais



Fonte: autor (2025)

Exame minucioso das placas negativas expõe a formação de cristais branco-acinzentados de sulfato de chumbo ($PbSO_4$) e depósitos amarelados de óxido de chumbo (PbO), sinais claros de um comprometimento interno significativo. Observa-se também o surgimento de gotículas ou partículas metálicas esféricas ('pérolas'), um efeito colateral ligado a reações termoelétricas fortes que impulsionaram a temperatura acima de 327,5 °C, causando o derretimento do chumbo.

Figuras 18 a 21 – Danos por queima de origem externa



Fonte: autor (2025)

Mostram calor irradiado que atua como propelente na criação de cristais esbranquiçados de sulfato de chumbo ($PbSO_4$) sobre as placas e estruturas de metal. Essa elevação da temperatura intensifica os processos químicos prejudiciais, o que provoca o enfraquecimento da estrutura e, por conseguinte,

o rompimento das peças internas, danificadas pela chama vinda de fora, ficando quebradiças ou fragmentadas.

G. Y. Plett& M. B. Johnson (2015), descreve que a deterioração das baterias de chumbo-ácido sob altas temperaturas é detalhada, abordando tanto o derretimento das placas quanto o surgimento de óxidos.

A conclusão técnica foi categórica: o incêndio teve como causa determinante o curto-circuito de origem termoelétrica na bateria, desencadeado por falhas de manutenção, ausência de travamento e degradação avançada da estrutura interna do acumulador. O fator contribuinte mais relevante foi a sulfatação associada à **vibração crônica**, que gerou desequilíbrio eletroquímico, produção de gases e rompimento estrutural. Os dados obtidos e a aplicação de métodos científicos permitiram elaborar um laudo pericial robusto, com alto grau de confiabilidade para fins judiciais e preventivos.

9 DISCUSSÃO SOBRE NORMAS E PROCEDIMENTOS CORRETIVOS

A prevenção de falhas em baterias automotivas depende diretamente da observância às normas técnicas que regulamentam a instalação, manutenção e descarte desses componentes. A ABNT NBR 15914:2018 estabelece parâmetros rigorosos para a fixação mecânica das baterias do tipo chumbo-ácido, orientando quanto à necessidade de suportes firmes, proteção contra vibração e disposição adequada de ventilação. Segundo a própria norma, a ausência desses elementos compromete o desempenho do acumulador e aumenta o risco de acidentes elétricos e térmicos.

De acordo com a NFPA 921 (2021), a metodologia de investigação e prevenção de incêndios deve partir de uma análise sistemática das causas, com foco na coleta de dados técnicos, observação de padrões de queima e exames laboratoriais, quando aplicáveis. A aplicação dessa norma no contexto

automotivo é essencial, pois orienta o profissional na reconstrução precisa da cadeia de eventos que levou à ignição. Ramos (2023) ressalta que a ausência de documentação de manutenção preventiva dificulta a rastreabilidade de falhas e pode comprometer a segurança do sistema elétrico veicular.

Um dos principais procedimentos corretivos está na revisão periódica dos terminais, conexões e polos da bateria, com atenção a sinais de oxidação, aquecimento e ressecamento dos cabos.

As conexões frouxas ou danificadas aumentam a resistência elétrica e favorecem a geração localizada de calor, sendo responsáveis por muitos focos de ignição em veículos de passeio e utilitários. A aplicação de torque adequado nos terminais e a verificação da integridade dos bornes são práticas recomendadas por fabricantes e reforçadas em manuais técnicos (Cunha e Oliveira, 2019 p. 03).

Outro ponto crítico é a verificação da densidade eletrolítica e do estado das placas internas, especialmente em baterias que operam em regime severo ou de longa duração. Segundo Costa (2021), a utilização de equipamentos de carga inadequados contribui para a sulfatação precoce e falhas internas por sobrecarga. Portanto, é indispensável o uso de carregadores compatíveis, com controle eletrônico de tensão, e a realização de ciclos completos de carga e descarga supervisionada. A adoção de equipamentos de dessulfatação também tem se mostrado eficaz em ambientes de frota e manutenção industrial.

Por fim, destaca-se a necessidade de treinamento técnico para operadores e profissionais da manutenção veicular, abordando não apenas aspectos operacionais, mas também critérios normativos e de segurança elétrica. A atualização constante sobre novas normas, como as revisões da ABNT e atualizações da NFPA, deve fazer parte da política de segurança das oficinas e centros automotivos. A negligência na observância dessas práticas pode resultar não apenas em perdas materiais, mas também em riscos à integridade física de condutores, passageiros e terceiros.

10 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A inspeção técnica do veículo periciado permitiu isolar a bateria automotiva como a zona de origem do sinistro, refutando hipóteses de falhas em outros sistemas periféricos. A análise integrada dos vestígios materiais e sua correlação com a literatura técnica revelou a seguinte dinâmica de falha:

10.1 Análise dos Vestígios de Ignição e Curto-Circuito

O exame visual preliminar identificou derretimento localizado e severo nos polos da bateria e deformação térmica irreversível da tampa plástica. Especificamente, observou-se a fusão do isolamento do cabo positivo em um único ponto, indicando uma descarga de alta intensidade. Conforme preconiza Stauffer et al. (2008), esse padrão de dano concentrado, em oposição a um derretimento difuso, é a assinatura física clássica de um curto-círcuito com arco elétrico, atuando como fonte primária de calor para a ignição dos materiais combustíveis adjacentes.

10.2 Falhas Mecânicas e Não Conformidades de Instalação:

Um fator crítico observado no estudo de caso foi a ausência completa do suporte de fixação da bateria. A perícia constatou marcas de abrasão na base do compartimento, evidenciando que o acumulador sofreu deslocamentos e impactos constantes durante a operação do veículo. À luz da ABNT NBR 15914 (2018), essa condição representa uma não conformidade grave, pois a vibração crônica promove o rompimento das conexões intercelulares e o colapso dos separadores internos, criando o caminho elétrico para o curto-círcuito interno observado.

10.3 Degradação Eletroquímica (Sulfatação) como Fator Contribuinte:

A desmontagem parcial da bateria revelou a presença maciça de cristais esbranquiçados aderidos às placas internas e resíduos de borra química no

fundo dos vasos. A comparação desses resíduos com os padrões descritos por Linden e Reddy (2002) confirma um quadro de sulfatação avançada (formação de $PbSO_4$ cristalizado). Essa condição não apenas reduziu a eficiência do componente, mas, conforme explica Costa (2021), elevou a resistência interna do sistema. O aumento da resistência, somado à corrente de carga do alternador, resultou em superaquecimento Joule (aquecimento resistivo) antes mesmo da ignição, preparando o ambiente para o evento térmico final.

10.4 Atmosfera Explosiva e Propagação:

A análise da carcaça evidenciou furos e fraturas compatíveis com expansão por pressão interna, e não apenas por derretimento externo. A ausência de uma válvula de alívio funcional no componente analisado impediu a exaustão dos gases gerados pela eletrólise excessiva (hidrogênio e oxigênio). Esse cenário valida a "falha por sinergia físico-química" descrita por Santos e Gomes (2020): a falha mecânica (vibração) gerou o curto (faísca), que encontrou um ambiente saturado por gases inflamáveis (eletrólise/sobrecarga) e materiais com isolamento degradado pelo calor (sulfatação).

Portanto, os resultados do caso confirmam que o incêndio não foi um evento isolado ou fortuito, mas a consequência direta de uma cadeia de falhas de manutenção e instalação, perfeitamente previsíveis segundo as normas da NFPA e ABNT.

11 CONCLUSÃO

A análise técnica desenvolvida ao longo deste estudo demonstrou, de forma clara e fundamentada, que baterias automotivas, especialmente do tipo chumbo-ácido, podem atuar como vetores críticos de ignição em veículos, sobretudo quando submetidas a condições inadequadas de instalação, uso e manutenção. O estudo de caso analisado comprovou a existência de múltiplas

falhas simultâneas, mecânicas, elétricas e químicas que culminaram na ignição termoelétrica com posterior propagação do fogo no compartimento do motor.

Entre os fatores determinantes para o evento analisado, destacaram-se a ausência do suporte de travamento da bateria, a sulfatação avançada das placas internas, a eletrólise, borra química e com acúmulo de gases inflamáveis e o consequente curto-círcito interno, que iniciou a reação de combustão. Tais elementos foram evidenciados por meio de vestígios físicos, padrão de queima e deformações térmicas analisadas conforme os preceitos metodológicos da NFPA 921 (2021) e da ABNT NBR 15914:2018.

A interpretação dos resultados revelou que a negligência na manutenção preventiva e a falta de adequação às normas técnicas foram os principais agravantes da ocorrência. A ausência de registros de inspeções recentes, bem como o uso de uma bateria já degradada, aponta para a importância de rotinas periódicas de verificação dos sistemas elétricos e energéticos de veículos automotores.

Com base nos achados técnicos, recomenda-se a adoção rigorosa de medidas corretivas, como a utilização de suportes de fixação robustos, o uso de baterias com válvulas de alívio operantes, o monitoramento da tensão de recarga, além de treinamentos específicos para profissionais da manutenção e perícia. Tais ações são fundamentais para mitigar os riscos de incêndio e promover maior confiabilidade operacional aos sistemas automotivos.

Conclui-se, portanto, que a integração entre as normas técnicas e boas práticas de manutenção constitui o caminho mais eficaz para a prevenção de incêndios causados por baterias automotivas. Este estudo contribui com a literatura técnica e pericial ao reforçar a necessidade de abordagem multidisciplinar e preventiva, reafirmando o papel da perícia técnica como instrumento de segurança e justiça.

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

REFERÊNCIAS

AKINYELE, D. O. et al. **Review of energy storage technologies for sustainable power networks.** Journal of Sustainable Energy Technologies and Assessments, Nova Zelândia, jul. 2014. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004>. Acesso em: 22 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15914:2018 - Baterias tipo chumbo-ácido para uso em veículos automotores – Instalação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BLOG DOS MECÂNICOS. **Conhece o funcionamento do motor de partida?** Jun. 2019. Disponível em: <https://www.blogmecanicos.com/2019/06/conoces-el-funcionamiento-del-motor-de.html>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BRASIL ESCOLA. **Associação de geradores.** Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/associacao-de-geradores.htm>. Acesso em: 22 abr. 2025.

COSTA, A. L. da. **Análise termográfica e falhas em baterias automotivas seladas.** Revista Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 33–42, 2021.

CUNHA, R. M. F.; OLIVEIRA, P. C. M. **Curto-círcuito em baterias de chumbo-ácido: causas e consequências.** Cadernos de Engenharia Mecânica, Uberlândia, v. 16, n. 1, p. 45–58, 2019.

FRAGMENTUM. **Sulfatação de baterias automotivas.** Disponível em: <https://fragmentum.srv.br/sulfatacao/>. Acessoem: 22 abr. 2025.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of Batteries.** 3. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2002. ISBN 0-07-135978-8.

LUFFE. **Sulfatação e dessulfatação: entenda de uma vez por todas.** Disponível em: <https://luffe.com.br/sulfatacao-e-dessulfatacao-entenda-de-uma-vez-por-todas/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MELO, Daniel França de Oliveira. **Análise de autenticidade de documentos.** Brasília, DF: Polícia Federal, SEPLOC/DPEMAP/INC/DITEC, 2023.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations.** Quincy: NFPA, 2021.

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

RAMOS, L. C. F. **Incêndios veiculares: diagnóstico técnico e prevenção.**
Revista Perícia em Foco, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 19–30, 2023.

SANTOS, M. F.; GOMES, C. J. **Análise de risco em sistemas de armazenamento de energia: o caso das baterias automotivas.** Revista Segurança e Tecnologia, Recife, v. 12, n. 1, p. 88–104, 2020.

STAUFFER, E. et al. **Fire debris analysis.** Burlington: Academic Press, 2008.
TUDOR. **Defeitos comuns em baterias automotivas.** Disponível em:
https://www.tudor.com.br/pt_br/produtos/automotiva-leve/defeitos-comuns.
Acesso em: 22 abr. 2025.

TUDOR. **O que é sulfatação das placas?** Disponível em:
https://www.tudor.com.br/pt_br/duvidas-frequentes/o-que-e-sulfatacao-das-placas. Acessoem: 22 abr. 2025.

BROUSSELY, M., & Archdale, G. (2004). Borra química"Li-ion and lead-acid batteries: Comparison and fundamentals" – **Journal of Power Sources.**
https://www.researchgate.net/publication/223792578_Li-ion_batteries_and_portable_power_source_prospects_for_the_next_5-10_years. Acessoem: 12 Mai. 2025.

G. Y. Plett & M. B. Johnson – *Battery Management Systems*, Volume II, Artech House, 2015. <https://books.google.com.br/books?id=1kSPCwAAQBAJ>. Acesso em: 12 Mai. 2025.

MELO, Daniel França de Oliveira. PCF. Estudo Técnico – Baterias Chumbo-Ácido – SEPOLOC/DPEMAP/INC/DITEC/PF. Diretoria Técnico-Científica, Instituto Nacional de Criminalística, Polícia Federal, Brasília, DF, Acesso em 12 Dez. 2025.