

PERÍCIA DE INCÊNDIO VEICULAR POR ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE FUGA TÉRMICA (“THERMAL RUNAWAY”) DECORRENTE DE FALHA EM BATERIA AUTOMOTIVA CHUMBO-ÁCIDO

Wanderlei Sena Nuvem¹

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18234581>

<https://orcid.org/0009-0007-5723-7219>

RESUMO

Este artigo explora, através de uma investigação detalhada de caso real, a razão por trás do colapso total de uma bateria automotiva comum de chumbo-ácido, combinando observações diretas e conceitos da eletroquímica. O objetivo é desvendar precisamente como a falha ocorreu, ligando os estragos visíveis na estrutura com as reações químicas e o calor envolvidos. As fotos realizadas após o evento danoso mostram um ataque severo do ácido da bateria em partes próximas e a destruição completa, com as placas internas transformadas em decorrência da ação química. A investigação técnica indica que o problema começou com uma fuga térmica, causada por excesso de carga ou um curto-circuito, levando à decomposição da água. A ignição da mistura de hidrogênio e oxigênio resultante provocou os danos no veículo. A conclusão é que essa falha representa um perigo sério, enfatizando a necessidade de verificar e seguir as regras técnicas (ABNT NBR 15940) para o sistema de recarga do carro e a própria bateria.

Palavras-chave: Bateria Chumbo-Ácido; Fuga Térmica; Gaseificação; Incêndio Veicular; Análise Pericial.

¹ Perito de Incêndio Automotivo – Certificação ABINVI – CORPO DE BOMBEIROS – ES

² Pós-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, e Especialista de Trânsito / Acidentologia na empresa WSN PERÍCIA - Trânsito e Transportes Consultoria Ltda - ME - MAT 392, credenciado pelo CONPEJ - Conselho Nacional Dos Perito Judiciais da República Federativa do Brasil - MAT: 01.00.1259 / ASPEJUDI RG: 1192 - Associação dos Peritos Judiciais, Árbitros, Conciliadores e Mediadores de Minas Gerais. 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.

Recebido em 01/11/2025

Revisão por pares (peer review) em 19/11/2025

Publicação em 08/01/2026

VEHICLE FIRE INVESTIGATION BY PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS OF THERMAL RUNAWAY RESULTING FROM A FAILURE IN A LEAD- ACID AUTOMOTIVE BATTERY

ABSTRACT

This article explores, through a detailed investigation of a real case, the reason behind the total collapse of a common lead-acid automotive battery, combining direct observations and concepts of electrochemistry. The objective is to precisely uncover how the failure occurred, linking the visible damage to the structure with the chemical reactions and heat involved. Photos taken after the damaging event show a severe attack of the battery acid on nearby parts and complete destruction, with the internal plates transformed as a result of the chemical action. The technical investigation indicates that the problem began with a thermal runaway, caused by overcharging or a short circuit, leading to the decomposition of water. The explosive ignition of the resulting hydrogen and oxygen mixture caused the damage to the vehicle. The conclusion is that this failure represents a serious danger, emphasizing the need to verify and follow the technical rules (ABNT NBR 15940) for the car's charging system and the battery itself.

Keywords: Lead-Acid Battery; Thermal Runaway; Gasification; Vehicle Fire; Expert Analysis.

1 Introdução especializada

As baterias de chumbo-ácido são bastante usadas tanto em carros quanto em sistemas fixos por serem acessíveis, fornecerem muita corrente e serem resistentes. No entanto, se algo der errado como sobrecarga, curto-circuito, falta de ventilação ou uso de carregadores inadequados, elas podem virar um foco de incêndio, representando um perigo importante em investigações forenses.

Uma análise técnica da Polícia Federal, presente no Estudo Técnico – Baterias Chumbo-Ácido – SEPLOC/DPEMAP/INC/DITEC/PF, mostra que o funcionamento químico dessas baterias se baseia na reação entre o ânodo de chumbo (Pb) e o cátodo de dióxido de chumbo (PbO₂), que ficam mergulhados em ácido sulfúrico diluído em água. O estudo oficial também diz que, se a tensão for maior que 2,45 V por célula (14,7 V em baterias de 12 V), a água se decompõe, liberando hidrogênio e oxigênio. Esses gases podem atingir níveis próximos ao mínimo necessário para pegar fogo (4% para o hidrogênio), aumentando muito o risco de explosão.

O documento técnico da Polícia Federal também indica que, em caso de curto-circuito ou problemas no carregamento, a temperatura interna sobe rapidamente, fazendo o eletrólito evaporar e a pressão aumentar demais. Isso pode levar ao rompimento da bateria e ao lançamento de ácido sulfúrico para fora. Mesmo nos modelos selados (VRLA), com sistemas de segurança e válvulas antichama, esses problemas podem superar a capacidade de contenção se houver muito calor ou falha no uso.

Portanto, tanto os conhecimentos técnicos quanto o estudo da Polícia Federal mostram que as baterias de chumbo-ácido são importantes em perícias, principalmente em investigações de incêndios em veículos, falhas elétricas ou suspeitas de ação proposital. É fundamental entender os processos químicos, térmicos e estruturais para diferenciar entre desgaste natural, falha de uso e um problema grave causado por alguém.

A bateria de chumbo-ácido é fundamental para o funcionamento dos carros, utilizando reações químicas que podem ser revertidas (BODE, 1977; CARNEIRO et al., 2017). Apesar de sua durabilidade, essa tecnologia necessita de um uso estável, já que sobrecarga elétrica e calor excessivo podem causar problemas sérios, como fogo e explosões (NUVEM, 2025).

1.1 Introdução e Questão Investigativa A ocorrência de falhas repentinas e explosivas em baterias de veículos é um assunto sério, exigindo uma investigação detalhada para identificar a causa primária. A principal dificuldade está em distinguir se a destruição total decorre de um problema interno (defeito de fabricação ou desgaste natural) ou de um fator externo (excesso de carga do alternador, curto-circuito). O caso em questão apresenta sinais visíveis de uma avaria completa da bateria.

1.2 Finalidade Este estudo tem como propósito conduzir uma avaliação técnico-científica, baseada em vestígios visuais de uma bateria automotiva de chumbo-ácido que sofreu uma falha grave, para:

1. Analisar os compostos químicos e as características físicas remanescentes no local do incidente.
2. Apontar o processo eletroquímico e térmico mais plausível que culminou na explosão.
- 3 . Relacionar os resultados com as práticas de segurança e as normas técnicas aplicáveis (ABNT NBR 15940).

1.3 Fundamentação Teórica O funcionamento eletroquímico da célula chumbo-ácido é resumido pela Reação Geral de Duplo Sulfato: A dano geralmente está ligada ao excesso de carga, que estimula a decomposição da água presente no eletrólito (liberação de gases), produzindo hidrogênio e oxigênio gasosos (BOCCHI et al., 2000):

A Instabilidade Térmica é o processo de progressão onde o aumento da temperatura, provocado pela corrente excessiva (Efeito Joule), reduz a resistência

interna, intensificando a produção de gases, o que, em um espaço fechado, leva à ignição da mistura gasosa explosiva sob forte pressão (CARNEIRO et al., 2017).

2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A presente pesquisa empregou a perícia técnica, com foco na análise qualitativa. Baseou-se na análise e interpretação de evidências (análise post-mortem) apresentadas através de imagens digitais.

2.1 Amostragem e aquisição de dados: A amostra consistiu no registro fotográfico de uma bateria automotiva de chumbo-ácido, bastante avariada. Os dados coletados foram as características morfológicas dos resíduos e a magnitude dos danos.

2.2 Etapas da análise a análise foi dividida em três fases:

1. Estudo Morfológico: Avaliação do estado da estrutura externa, das conexões e das placas internas. O foco recaiu sobre o aspecto laminado, calcinado e deformado.

2. Identificação Química Preliminar: Dedução da composição dos resíduos a partir das reações (Equações 1 e 2) e dos produtos da corrosão de metais pelo H_2SO_4 . O material esverdeado/acinzentado e o material branco/acinzentado foram associados a sulfatos e óxidos de chumbo/metals.

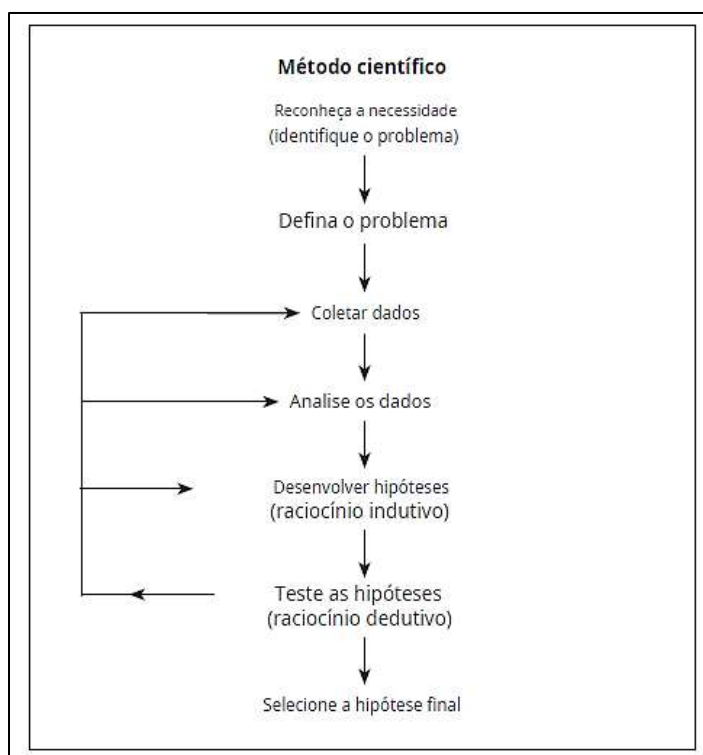
3. Definição do Mecanismo de Avaria: Aplicação de conhecimentos em eletroquímica e segurança de baterias para relacionar os danos estruturais (ruptura) com o evento explosivo resultante da fuga térmica, de acordo com a literatura e análises laboratoriais.

2.3. Roteiro da Análise: A análise foi organizada em três fases:

Adotando essa linha de investigação, conseguimos compreender precisamente os possíveis desencadeadores do ocorrido. Conectamos elementos como negligência, equívocos na instalação da bateria, deterioração por vibração e ausência de salvaguarda correta. Desse modo, evidenciamos a relevância de uma avaliação técnica especializada para impedir sinistros e aumentar a segurança dos automóveis.

A averiguação de princípios de incêndio em baterias automotivas exige uma abordagem técnica e aprofundada, alicerçada em padrões consolidados, a exemplo da NFPA 921 (Manual de Investigação de Incêndios e Explosões) Capítulo 4 Metodologia Fundamental. Confira a seguir as etapas e fundamentos da metodologia de apuração:

NFPA 921 (Guia para Investigações de Incêndio e Explosão) Capítulo 4 Metodologia Básica



Etapas Críticas:

1. **Preservação do local e isolamento.**
2. **Análise dos padrões de chama e danos físicos.**
3. **Exame físico-químico dos vestígios (fios, bateria).**
4. **Exclusão de hipóteses (Crime vs. Acidente).**

2.3. 1 Análise Detalhada do Veículo

- Identifique o modelo e a natureza do incêndio.

2.3. 2 Preservação e Isolamento da Área

- Proteja a área para evitar a perda de evidências cruciais.
- Registre meticulosamente o estado original antes de qualquer intervenção.

2.3. 3 Documentação Precisa do Ocorrido

- Use fotos, esboços e relatos testemunhais para uma descrição completa.
- Investigue o histórico do veículo, revisões e modificações não autorizadas.

2.3. 4 Análise dos Padrões das Chamas

- Examine os danos ao veículo e à bateria, focando em deformações, rupturas e áreas de maior dano térmico.
- Observe a progressão do fogo (focos) dentro e fora do capô para identificar a origem e o caminho das chamas.

2.3. 5 Identificação da Causa do Fogo

- Busque indícios como:
- Curto-circuitos internos ou externos.
- Sobrecarga elétrica.
- Liberação de gases inflamáveis de baterias de chumbo-ácido.
- Cristalização das placas, indicando reações químicas internas.
- Fragmentação das placas, sugerindo exposição ao fogo externo.
- Sinais de aquecimento excessivo na fiação.
- Danos por calor nos cabos do alternador e motor de partida.
- Derretimento em conectores.
- Presença de resíduos esverdeados nos cabos.
- Posicionamento da bateria.
- Integridade do suporte de fixação.

- Colete amostras da bateria e áreas adjacentes para análise de resíduos de combustão.

2.3. 6 Avaliação das Causas Prováveis

- Descarte hipóteses improváveis, considerando recalls, defeitos conhecidos e negligência.
- Considere fatores externos como colisões, instalações elétricas inadequadas, calor intenso ou impactos.

2.3. 7 Qualificação do Perito

- O perito deve possuir certificações em investigação de incêndios veiculares, além de conhecimento em química, eletricidade e mecânica automotiva.

2.3. 8 Normas e Procedimentos Adequados

Aplique as diretrizes da NFPA 921, normas contra incêndio e protocolos específicos dos Bombeiros, fundamentados em princípios técnicos e científicos.

2.3.9 Exames laboratoriais.

2.3.10 Resumo tabelado da metodologia

Etapa	Descrição
Isolamento do local	Evitar contaminação e preservar evidências
Documentação inicial	Fotos, testemunhos e histórico do veículo
Análise dos vestígios	Padrões de queima, deformações e danos
Identificação da ignição	Diagnóstico físico-químico dos possíveis focos

Avaliação de causas	Exclusão de hipóteses, relação com manutenção/recall
Elaboração do laudo	Relatório técnico, embasamento em normas e literatura
Capacitação profissional	Certificações em incêndio automotivo e áreas correlatas

Esta abordagem busca assegurar precisão, imparcialidade e estudo aprofundado de sinistros envolvendo baterias automotivas, contribuindo para evitar futuros incidentes e salvaguardando as responsabilidades judiciais, criminais e securitárias.

3. DOS EXAMES

Os exames técnicos foram realizados em dois veículos sendo: O primeiro veículo **FIAT/UNO MILLE WAY ECON DE COR FANTASIA** encontrava se em oficina mecânica na cidade de Montes Claros MG, conforme registro do Boletim de Ocorrência Policial, incêndio ocorrido e registrado **CHACREAMENTO ENCONTRO DAS ÁGUAS – MIRABELA / MG** onde o **SR. A. C. R. S**, declara que:

“Ele alega que conseguiu encostar o veículo a beira da estrada e quando abriu o capô para averiguar o problema, constatou que o motor estava em chamas. Ainda segundo o solicitante, ele teria se assustado com o fogo e soltou o capô que travou, e quando ele tentou pegar o extintor no interior do carro...”

O segundo veículo **RENAULT/MEGANE GT DYN 20A DE COR CINZA**, que encontrava-se na Cidade de Belo Horizonte MG em oficina particular preservado. Onde o condutor relata que transitava pela BR 381 **RODOVIA BR 381 KM 487,0 – BETIM – MG**

“O veículo V1 transitava pelo sentido crescente da via quando, por motivo não confirmado, iniciou-se um incêndio que atingiu 1/3 da estrutura de V1, em sua parte frontal...”

3.1 Imagens do dia do evento danoso



Figura 01 a 04, extraídas do Boletim de Ocorrência Policial, mostram o veículo no dia e local do evento danoso.

3.2 Dos exames técnicos

3.2.1 – Do setor anterior



Figuras 05 e 06 – Mostram panorâmica do capô com danos por queima e laminação seca, não sendo constatada a utilização de material acelerante derivado de hidrocarboneto.

3.2.2 – Do compartimento do motor concentração de queima



Figuras 07 e 08 – Setas vermelhas mostram compartimento do motor (capô), evidenciando danos térmicos generalizados resultantes da ação de chamas, com maior intensidade concentrada no lado direito. Observam-se alteração na coloração superficial e na têmpera do aço, indicativas de exposição a elevadas temperaturas e consequente modificação estrutural do material.

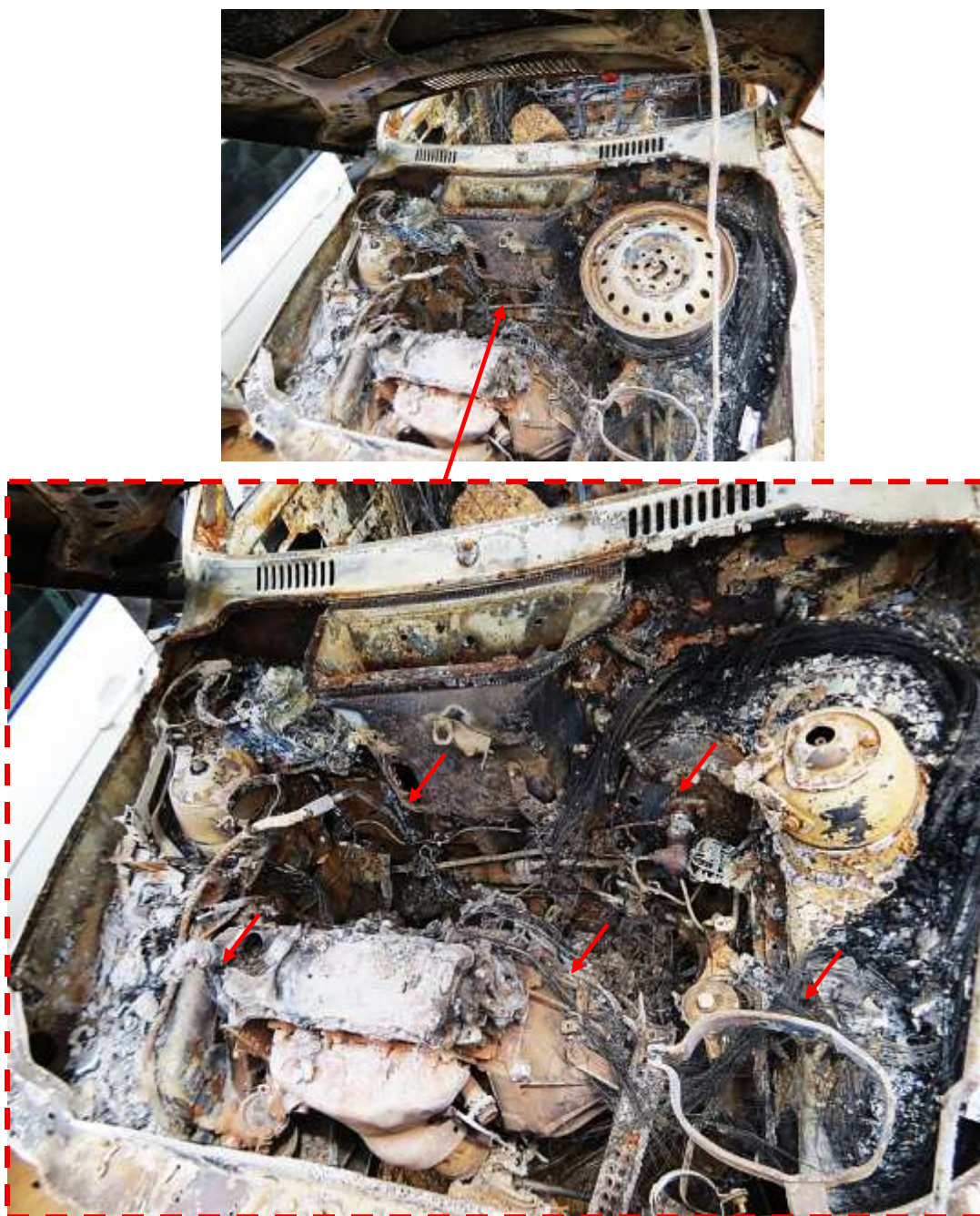


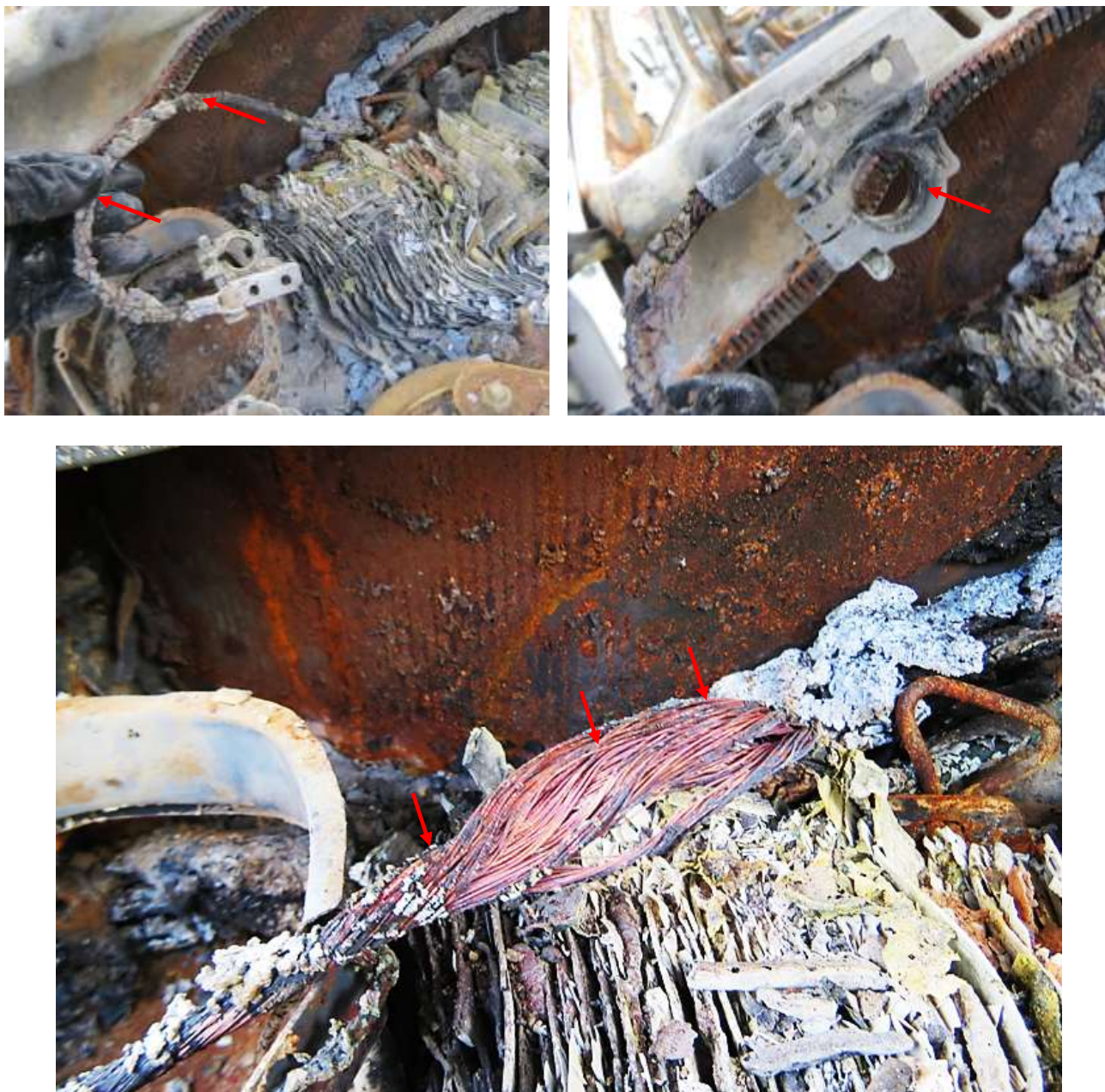
Figura 09 – Setas vermelhas mostram parte interna do habitáculo do motor, com danos por queima, sem evidências técnicas de utilização de material acelerante ou espargimentos.

3.2.3 Das fiações adversas



Figuras 10 a 13 – Setas vermelhas mostram fiações adversas do habitáculo do motor com danos por queima, sem anormalidades técnicas por curto-circuito ou fusão.

3.2.4 Do cabo negativo da bateria



Figuras 14 a 16 – Setas vermelhas mostram fiação calibrosa negativa da bateria com danos por queima, apresentando enrijecimento decorrente de sobrecarga interna, promovendo a modificação da coloração da estrutura.

3.2.4.1 Análise técnico-científica

A tonalidade dos cabos de cobre, em vermelho escuro e áreas pretas, comprova o superaquecimento considerável causado pelo efeito Joule. Em decorrência curto, nas placas internas do acumulador de energia / bateria.

A base desse acontecimento é a Lei de Joule, cuja expressão é:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

onde:

- Q é o calor gerado (em joules),
- I é a corrente elétrica (em amperes),
- R é a resistência elétrica do condutor (em ohms),
- t é o tempo de duração do fluxo de corrente (em segundos).

Devido à sua baixa resistividade (cabo de bitola larga), a corrente elétrica da bateria conseguiu aquecer o material muito depressa, ultrapassando os 1000 °C. Essa temperatura elevada foi capaz de gerar:

- Derretimento de uma parte dos filamentos de cobre;
- Oxidação pelo calor (com criação de óxidos de cobre I e II, que dão as cores avermelhadas e escuras);
- Decomposição térmica das proteções plásticas, notada pela sobra de carvão ao redor. Este processo configura o evento conhecido como ponto quente (hot spot), típico de falha elétrica direta em sistemas de 12 V com alta capacidade de descarga. A referência técnica para este tipo de ocorrência encontra-se nas normas:

- **SAE J1637 – Electrical Terminal Conductivity and Joint Resistance Testing;**
- **ISO 16750-2 – Road Vehicles — Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment;**

- NFPA 921:2021 – Guide for Fire and Explosion Investigations (capítulo sobre falhas elétricas e curto-circuito inicial).

A coloração avermelhada resulta da oxidação térmica de alta temperatura, e o escurecimento, da carbonização de materiais poliméricos e depósitos de cobre oxidado. O fenômeno evidencia falha primária de isolamento ou movimentação mecânica dos cabos, sendo uma causa provável de ignição elétrica inicial em incêndios automotivos.

A tonalidade avermelhada notada em fios de cobre em incêndios de carros pode surgir de diferentes tipos de aquecimento, não sendo só por curtos-circuitos. Se o fogo vier de fora, como de gasolina vazando e pegando fogo, o cobre, ao esquentar muito, enferruja, criando óxidos.

Nesses casos, vemos **óxido cuproso (Cu_2O)**, que dá um tom avermelhado-laranja, e **óxido cúprico (CuO)**, de cor preta, ambos feitos quando o cobre reage com o ar quente. Ao mesmo tempo, a capa de plástico dos fios queima, virando um carvão escuro que gruda no fio.

Assim, o que podemos ver é:

- **Cobre enferrujado** → fica vermelho ou escuro;
- **Plástico queimado** → escurece e não isola bem a eletricidade;
- **Curto-circuito** → pode parecer igual, mas tem outras pistas.

Quando há um curto-circuito, o cobre avermelhado vem junto com outras coisas, como:

- **Partes do metal derretidas;**
- **Perolas (pearls) nos fios;**
- **Pontos que esquentaram muito;**
- **Marcas de faíscas, com cantos lisos e metal recristalizado.**

Portanto, só porque os fios estão vermelhos ou escuros **não quer dizer que o fogo começou por um curto-circuito**. Isso também pode acontecer se o fogo veio de gasolina queimando ou se espalhou pelo veículo.

Para descobrir a causa do incêndio, é preciso analisar tudo junto: as marcas, como o fogo se espalhou, o que aconteceu no carro e se a causa faz sentido. A cor do cobre só ajuda se combinada com outras pistas, seguindo as regras de investigação de incêndios.

4 DO CABO POSITIVO DA BATERIA





Imagens 17 a 21 – Setas vermelhas mostram soquete terminal do cabo positivo, apresentando fusão metálica parcial com o polo da bateria, formação de pérolas metálicas (perolamento) e fiação com coloração avermelhada e enrijecida.

Essas características são compatíveis com exposição térmica intensa e efeitos termoeletrônicos provenientes de curto-circuito.

4.1 Interpretação Termoeletrônica:

O perolamento metálico indica que o condutor (possivelmente cobre ou liga metálica similar) atingiu temperatura suficiente para ultrapassar seu ponto de fusão (~1083 °C no cobre), com formação de esferas metálicas devido à tensão superficial do metal fundido, típica de descarga elétrica local.

A coloração avermelhada dos fios e a carbonização superficial são evidências de aquecimento interno por efeito Joule, fenômeno característico de sobre corrente ou curto entre condutores energizados e massa.

4.2 Análise Físico-Química do Material:

A oxidação e os resíduos esbranquiçados sobre a área metálica comprovam, reação com eletrólitos e sais residuais, possivelmente oriundos da bateria automotiva, sugerindo vazamento eletrolítico prévio que pode ter contribuído para a redução da resistência de isolamento e consequente falha dielétrica.

4.3 Causal Técnica:

O conjunto de evidências (fusão, perolamento, coloração e degradação do isolamento) aponta para curto-circuito de origem interna no condutor positivo, gerando arco elétrico localizado, com subsequente ignição de materiais combustíveis adjacentes. Esse tipo de evento é comum em sistemas automotivos quando há conexões frouxas, sulfatação ou falhas de isolamento na base do terminal positivo.

O terminal positivo e sua fiação associada sofreram danos térmicos e elétricos de alta intensidade, característicos de curto-circuito de origem no próprio sistema elétrico / bateria. As evidências de fusão metálica e perolamento confirmam a ação exotérmica do arco elétrico, capaz de elevar a temperatura local acima de 1000 °C, provocando a

deterioração total do condutor e podendo atuar como ponto primário de ignição do incêndio veicular.

5 DA BATERIA

POLÍCIA FEDERAL – QUÍMICA

PCF - Daniel França de Oliveira Melo – SEPLOC/DPEMAP/INC/DITEC/PF

O IMPACTO DAS BATERIAS COMO FONTE DE IGNIÇÃO

Princípio de funcionamento

- **Anodo:** placa de chumbo esponjoso Pb.
- **Catodo:** placa de Dióxido de Chumbo PbO₂
- **Eletrólito:** solução aquosa de ácido sulfúrico a 37%.

$$\text{ANODO: } \text{Pb} \xrightleftharpoons[\text{charge}]{\text{discharge}} \text{Pb}^{2+} + 2e^-$$

$$\text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \xrightleftharpoons[\text{charge}]{\text{discharge}} \text{PbSO}_4$$

$$\text{CATODO: } \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2e^- \xrightleftharpoons[\text{charge}]{\text{discharge}} \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$$

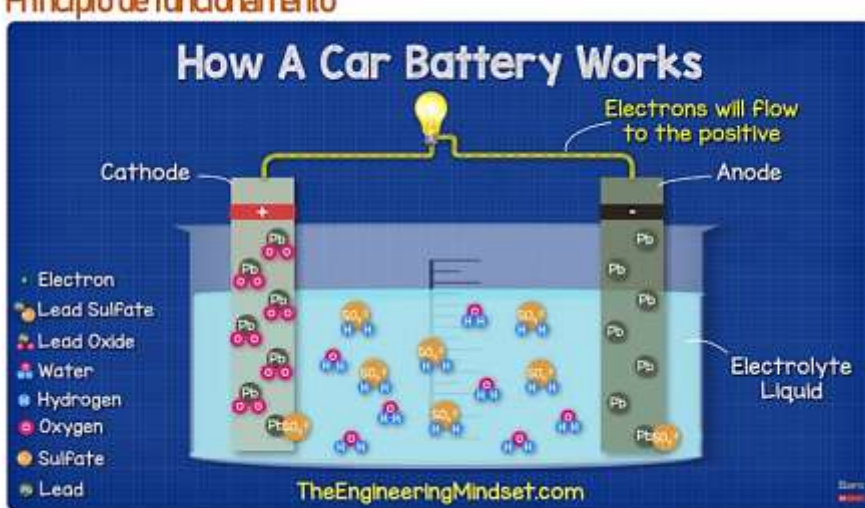
$$\text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \xrightleftharpoons[\text{charge}]{\text{discharge}} \text{PbSO}_4$$

REAÇÃO FINAL

$$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \xrightleftharpoons[\text{charge}]{\text{discharge}} 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$

Princípio de funcionamento

How A Car Battery Works



Electrons will flow to the positive

Cathode

Anode

Electrolyte Liquid

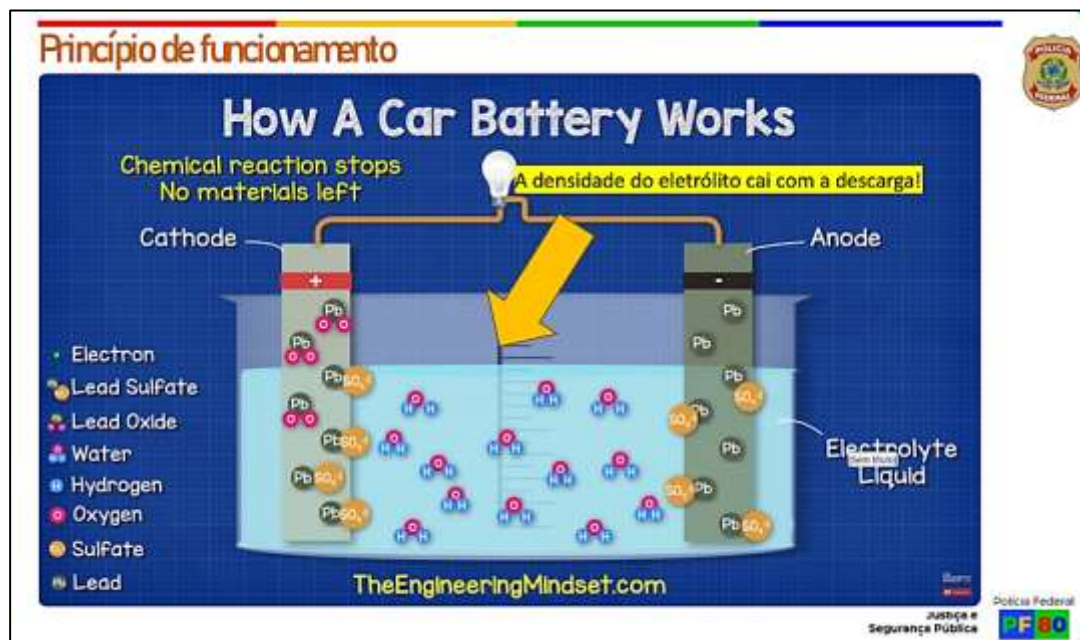
Legend:

- Electron
- Lead Sulfate
- Lead Oxide
- Water
- Hydrogen
- Oxygen
- Sulfate
- Lead

TheEngineeringMindset.com

Polícia Federal

Junta de Segurança Pública



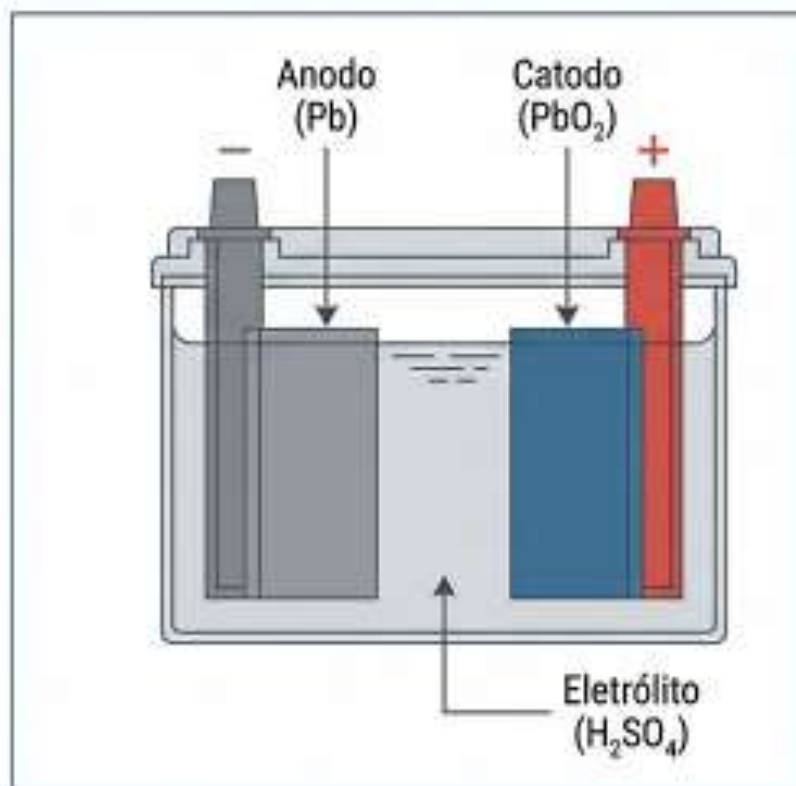
As ilustrações mostram como opera uma bateria de carro comum, daquelas de chumbo-ácido, explicando em detalhes as transformações eletroquímicas que acontecem quando ela está descarregando. O esquema revela as reações nos elementos internos: o cátodo (placa de dióxido de chumbo, PbO_2), o ânodo (placa de chumbo, Pb) e o líquido eletrólito (uma solução diluída de ácido sulfúrico, H_2SO_4).

Quando a bateria descarrega, o sulfato do eletrólito (SO_4^{2-}) se junta ao chumbo das placas, criando sulfato de chumbo (PbSO_4). Os elétrons seguem pelo circuito externo, ligando algo que precisa de energia (como uma lâmpada), enquanto os íons de hidrogênio e oxigênio reagem no eletrólito, diminuindo aos poucos a força da solução ácida. Isso continua até acabar o material que reage; quando isso acontece, a reação para e a bateria está descarregada.

As imagens também enfatizam que, conforme a descarga avança, a força do eletrólito diminui, e essa medida é usada para saber quanta carga ainda resta na bateria. Considerando tudo isso, vamos analisar a parte físico-química.

Diante do exposto, vejamos análise físico-química.

5.1 Anatomia do perigo: baterias chumbo-ácido;



Fonte: Autor

5.1.1 Química e risco

Funcionamento: Reação entre Chumbo e Dióxido de Chumbo em Ácido Sulfúrico.
O Gatilho: Tensão > 2,45 V/célula provoca eletrólise da água.

Reação de Gaseificação: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$, Alerta de Perigo: O Hidrogênio (H_2) torna-se explosivo em concentrações acima de 4%, onde em ambiente confinado (motor), essa mistura é uma bomba relógio, devido a mistura de outros gases existentes.



Figuras 22 e 23 – Setas amarelas mostram vestígios de danos nas placas positivas, evidenciando fusão completa e fragmentação dos materiais, além de contaminação por óxido de chumbo (PbO), caracterizado pela tonalidade amarelada.

Setas vermelhas tracejadas mostram placas de dióxido de chumbo (PbO_2), com coloração marrom, enquanto as **setas vermelhas** apontam para as placas negativas, constituídas de chumbo metálico (Pb). Essas condições resultaram em curto-circuito interno da bateria.

Além disso, notar substâncias claras nas áreas das células denota sulfatação. Isso surge da interação do material ativo e do eletrólito, criando resíduos cristalizados de sulfato de chumbo (PbSO_4), que afetam o bom funcionamento da bateria.

Os dados físicos mostram avarias permanentes na bateria, com deterioração das partes internas causada por corrente excessiva e corrosão, ligadas a um curto interno e ao depósito de compostos de sulfatação.

5.2 DA COMPARAÇÃO TÉCNICA DE CONTAMINAÇÃO QUÍMICA

Princípio de funcionamento



Sulfato de Chumbo – branco

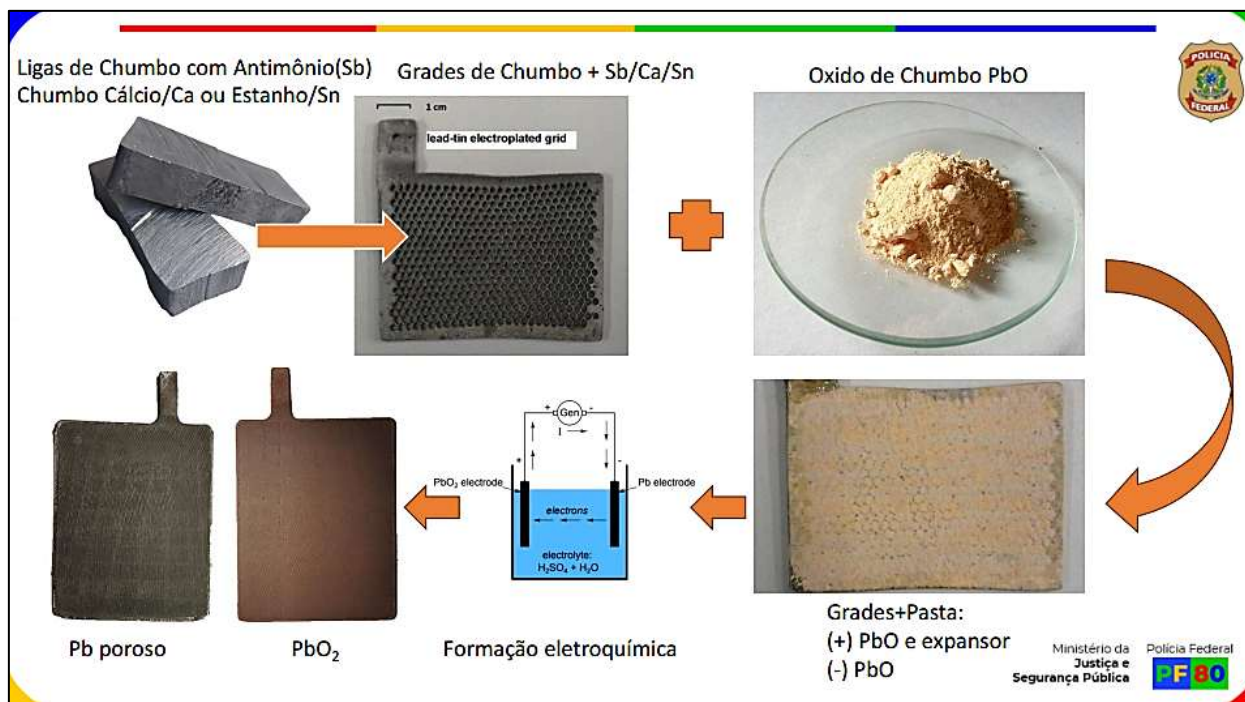
Dióxido de Chumbo – marrom

SULFATAÇÃO

Ministério da Justiça e Segurança Pública

Polícia Federal

PF 80



Após exames químicos detalhados e comparativos, notamos que a bateria exibe todos os sinais típicos, tanto técnicos quanto científicos, de poluição química. Detectamos restos e subprodutos da deterioração, provenientes das reações que ocorrem internamente. Essa situação demonstra claramente a presença de corrosão e reações não planejadas, que levam à deterioração química das placas internas, da solução eletrolítica e dos outros elementos do sistema, afetando de maneira drástica seu funcionamento e a segurança durante o uso.

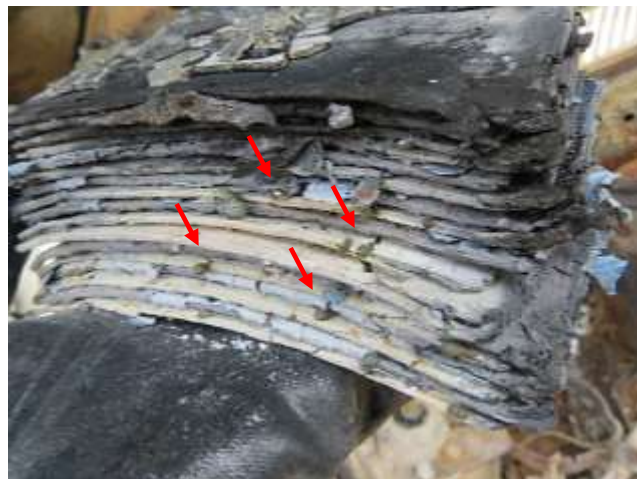
6 DO EFEITO EXOTÉRMICO

Durante o funcionamento da bateria do carro, seja carregando ou descarregando, ocorre produção de calor, um fenômeno conhecido como efeito exotérmico.

Essa elevação da temperatura é resultado tanto das reações químicas internas quanto da resistência dos componentes, e o excesso de calor pode causar sérios danos à bateria e ao automóvel.



Figuras 24 e 25 – Setas vermelhas mostram vestígios nas placas de chumbo, vasos e células dos polos positivo e negativo, apresentando danos por derretimento completo, gerando de nucleação nas placas de chumbo e conectores, decorrentes de curto-circuito interno, bem como material esbranquiçado na superfície, oriundo da sulfatação das células e do material eletrolítico.



Imagens 26 a 28 – Setas vermelhas mostram placas positivas, apresentando danos por queima, contaminação e formação de pérolas de fusão.

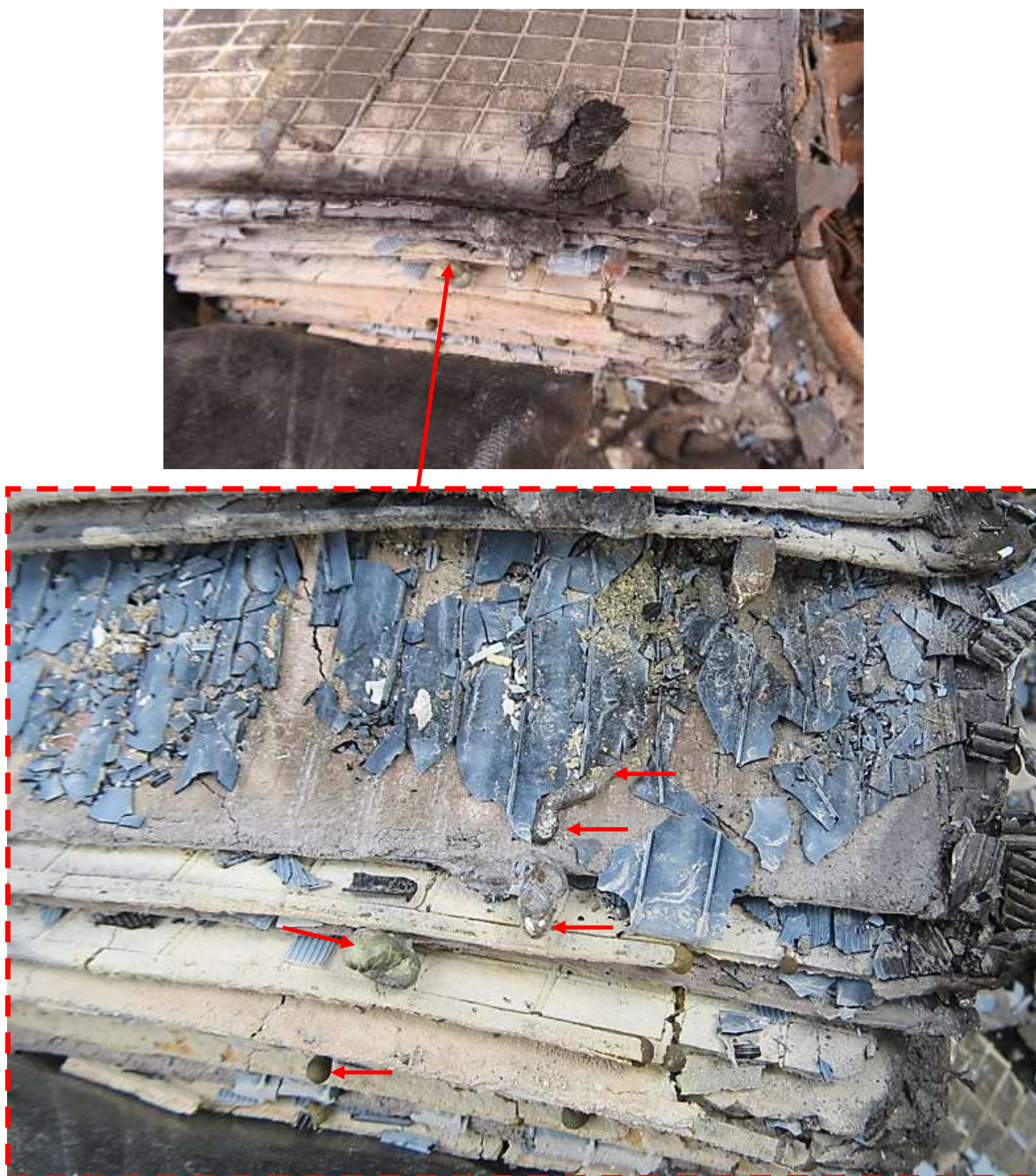


Imagem 29 – **Setas vermelhas** mostram placas positivas da bateria, apresentando danos severos por queima e contaminação, resultantes de reação química indesejada e falha eletroquímica interna. Observa-se derretimento total da placa

negativa, sendo possível identificar apenas fragmentos remanescentes, caracterizados por pérolas de fusão originadas pelo calor intenso do evento ocorrido.

A análise química dos materiais revela sinais claros de sobrecarga elétrica, um processo de corrosão acelerado e a deterioração química resultante de um curto interno. Isso causa danos à estrutura, diminui o desempenho e gera contaminação por resíduos tóxicos de chumbo e substâncias relacionadas.

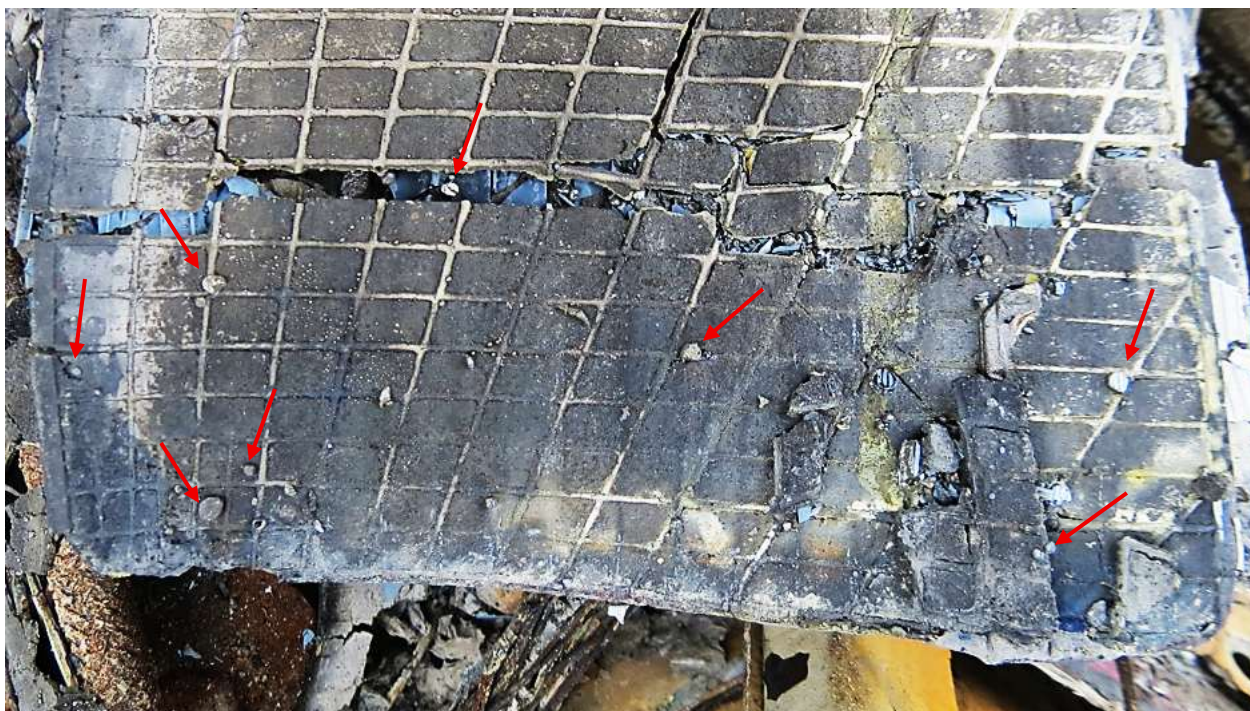


Figura 30 – Setas vermelhas mostram placa positiva da bateria, exibindo graves avarias devido a superaquecimento e vestígios de poluição química. Além disso, foi identificada a existência de focos de metalização, resultantes do desprendimento de partes dos polos negativos, o que demonstra a formação de um curto interno na célula eletroquímica.

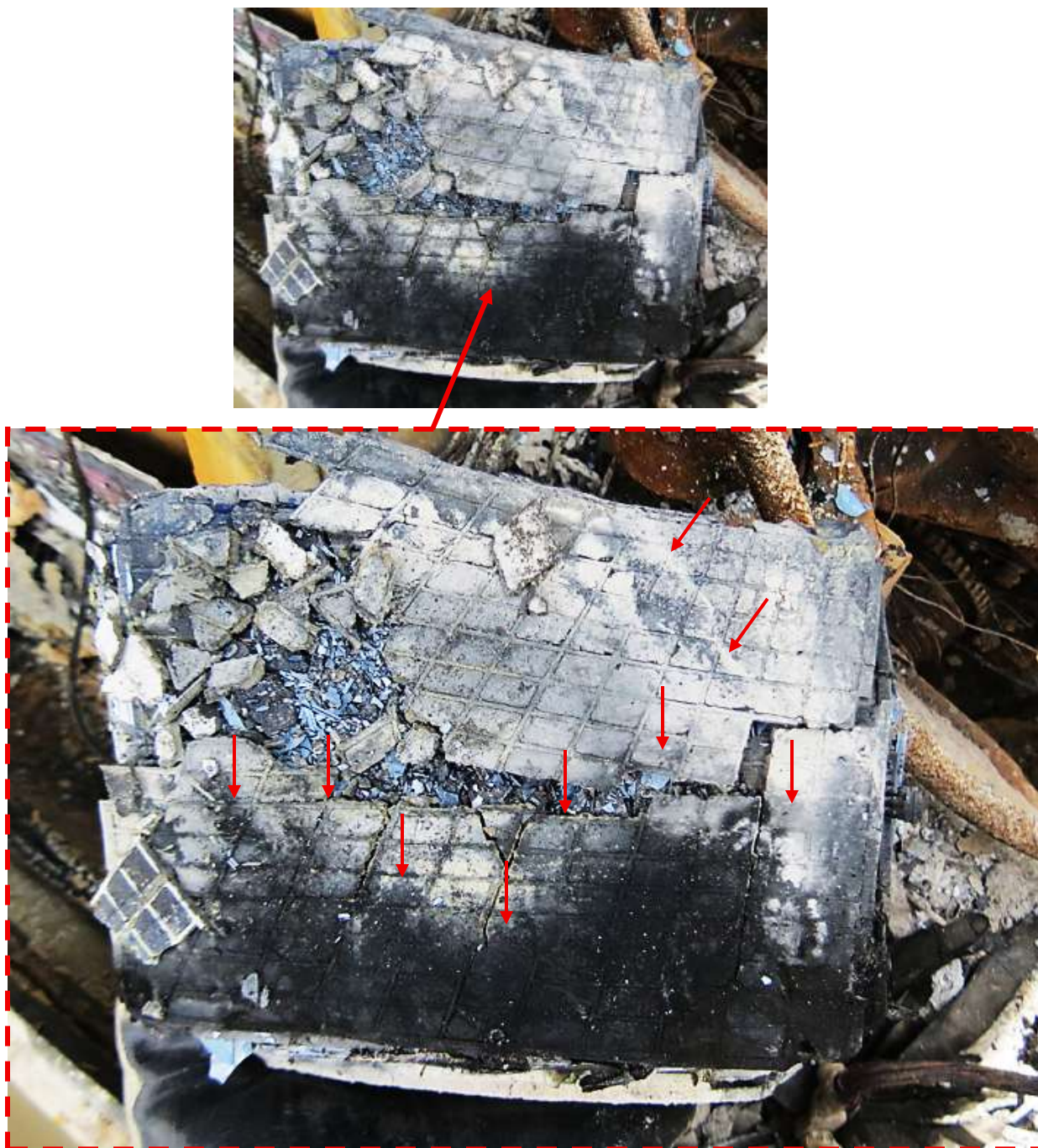
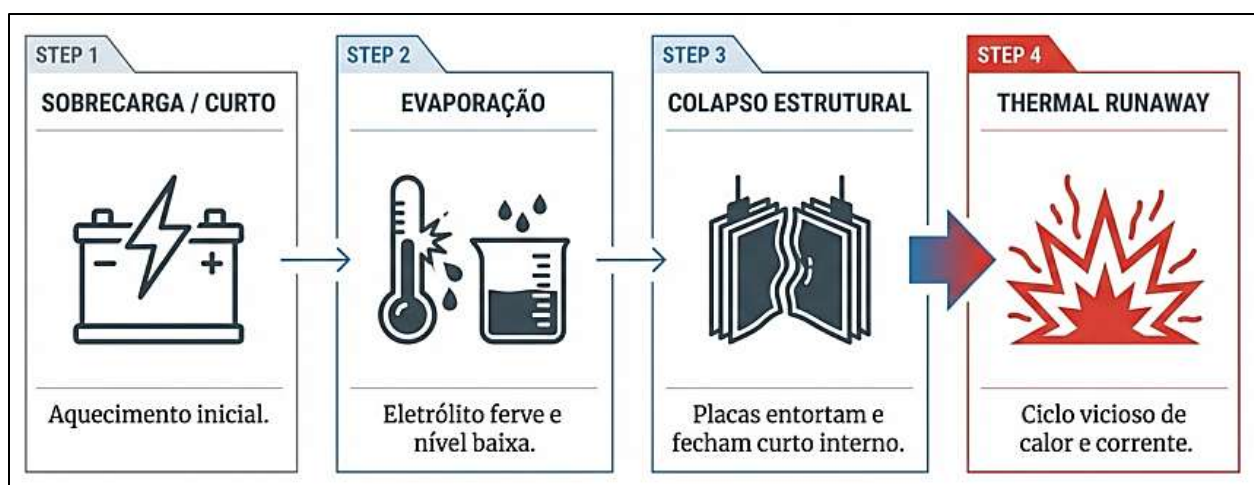


Figura 31 – Setas vermelhas mostram placa positiva da bateria com processo de deterioração. A análise macroscópica aponta para a perda de umidade do eletrólito e o surgimento de sulfato de chumbo (PbSO_4) na área ativa. Esses aspectos evidenciam a

degradação eletroquímica provocada por descargas intensas e frequentes ou longos períodos. Tais condições afetam a passagem de íons e diminuem a eficiência da bateria.

6.1 - DA FUGA TÉRMICA

6.1.1 - O MECANISMO DA FALHA



Fonte: Tabela Autor

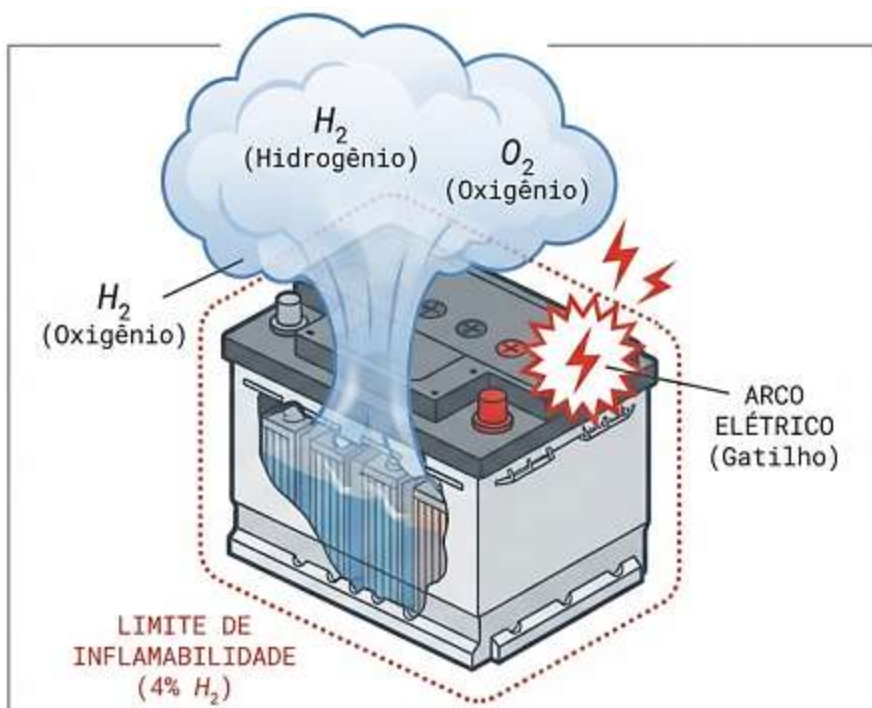
O descontrole térmico em baterias de chumbo-ácido manifesta-se como um ciclo vicioso de calor, no qual o aumento da temperatura interna provoca reações que liberam energia, comprometendo a resistência dos materiais e fluidos internos. Conforme a temperatura sobe, a resistência interna da célula diminui e as reações químicas se intensificam, elevando a produção de corrente e calor. Essas reações estabelecem um ciclo de realimentação térmica positiva que pode resultar na rápida degradação dos componentes da célula, liberação de gases inflamáveis, rompimento do separador, curto-circuito interno e, em situações extremas, explosão ou incêndio.

6.1.2 Em termos de físico-química:

- O aumento da temperatura acelera a velocidade das reações de decomposição do eletrólito e dos materiais dos elétrodos (Lei de Arrhenius).

- A redução da resistência interna, causada pela degradação térmica, facilita a passagem de altas correntes internas.
- O calor gerado por essas reações e pela passagem de corrente excede a capacidade da célula de dissipar calor, criando um ciclo de realimentação positiva.
- Esse ciclo representa o mecanismo central do descontrole térmico, onde a produção de calor é maior que a remoção de calor, levando à autoignição térmica da célula.

6.1.3 A química da explosão



Fonte: Autor

O superaquecimento da bateria fez com que o ácido sulfúrico entrasse em ebulição, acelerando a quebra da água presente na solução. Com isso, grandes quantidades de hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) foram liberadas, preenchendo o espaço interno da bateria e criando uma mistura que pega fogo muito fácil.

Assim que o hidrogênio passou de um certo nível (mais ou menos 4% do volume no ar), o ambiente dentro da bateria ficou pronto para explodir. Um curto-circuito interno, provocado por faíscas nas partes metálicas (sinal de arco elétrico), funcionou como a faísca que faltava para iniciar a explosão.

A faísca do curto-circuito fez a mistura de hidrogênio e oxigênio explodir de repente, causando uma pressão enorme que estourou a caixa da bateria. Os pedaços da bateria foram arremessados com força, o ácido sulfúrico se espalhou no ar e os gases pegaram fogo, gerando chamas e calor intenso ao redor.

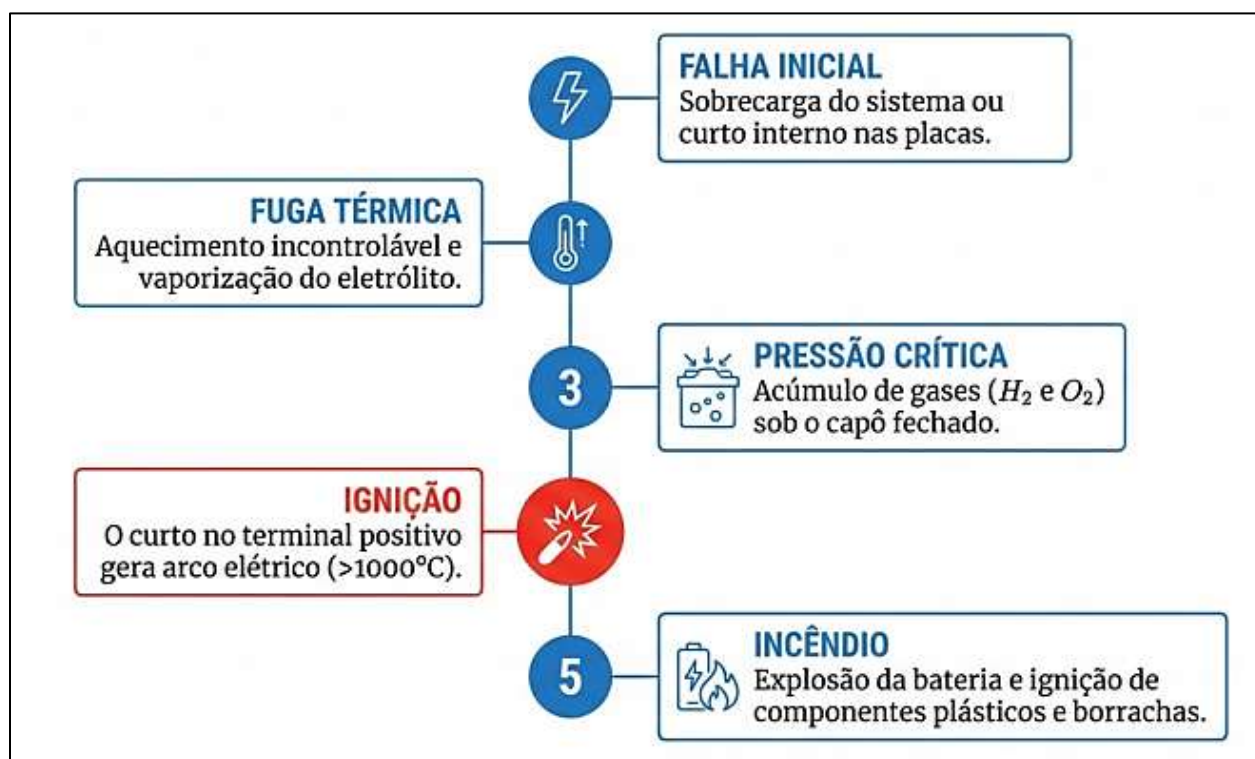
Considerando as reações químicas e físicas, o que aconteceu foi uma explosão química causada por uma faísca, resultado de problemas de temperatura e eletricidade dentro da bateria chumbo-ácido.

6.1.3.1 Mecanismos Científicos Envolvidos

- **Eletrólise do eletrólito aquecido:**
$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 (\uparrow) + \frac{1}{2}\text{O}_2 (\uparrow)$$
- **Acúmulo de hidrogênio acima do LIE - Limite Inferior de Explosividade (4%)**
- **Arco elétrico interno como fonte de ignição**
- **Deflagração rápida com sobre pressão confinada**

6.2 A Cronologia

6.2.1 Análise técnica pericial – mecanismo de incêndio em bateria chumbo-ácido



Fonte: Tabela Autor

6.2.1.1 Causa Inicial (O Começo do Problema)

A ilustração mostra que o evento primário é o sistema elétrico sobrecarregado ou um curto-circuito dentro da bateria de chumbo-ácido. Ambas as situações fazem a corrente elétrica subir muito e a temperatura interna aumentar, criando uma falha elétrica ativa.

Em baterias de chumbo-ácido, sobrecarga e curtos internos causam grande dissipação de energia por efeito Joule (I^2R), esquentando o eletrólito aos poucos.

6.2.1.2 Fuga Térmica (O Incêndio Crescendo)

O calor constante é maior do que a bateria consegue suportar, causando a fuga térmica. Nesta fase, acontece o seguinte:

- A temperatura sobe sem controle
- Parte do eletrólito sulfúrico vira vapor
- A eletrólise da água no eletrólito aumenta muito

6.2.1.3 Pressão e Gás Perigoso Aumentando

A fuga térmica libera muito hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), que se acumulam no motor, principalmente com o capô fechado, como a imagem mostra.

O hidrogênio é inflamável com apenas 4% no ar, tornando o ambiente muito explosivo quando está fechado.

6.2.1.4 Ignição (O Que Causa o Fogo/Explosão)

A imagem deixa claro que o curto-circuito no terminal positivo causou a ignição, criando um arco elétrico com mais de 1.000 °C.

Esse arco elétrico pode:

- Incendiar a mistura de H_2/O_2
- Causar uma explosão rápida
- Gerar muita pressão de repente

Em investigações de incêndios, isso é chamado de ignição elétrica por arco, comum em casos com baterias.

6.2.1.5 Incêndio e Explosão

A mistura de gás pegou fogo e explodiu a bateria, quebrando a caixa de plástico, jogando pedaços para todos os lados e espalhando eletrólito ácido. Depois, outros materiais inflamáveis pegaram fogo, como:

- **Plásticos da caixa**
- **Borrachas**
- **Isolantes elétricos**

Isso mostra um incêndio elétrico com uma explosão no começo, que combina com os danos e a sequência.

7 DA ANÁLISE

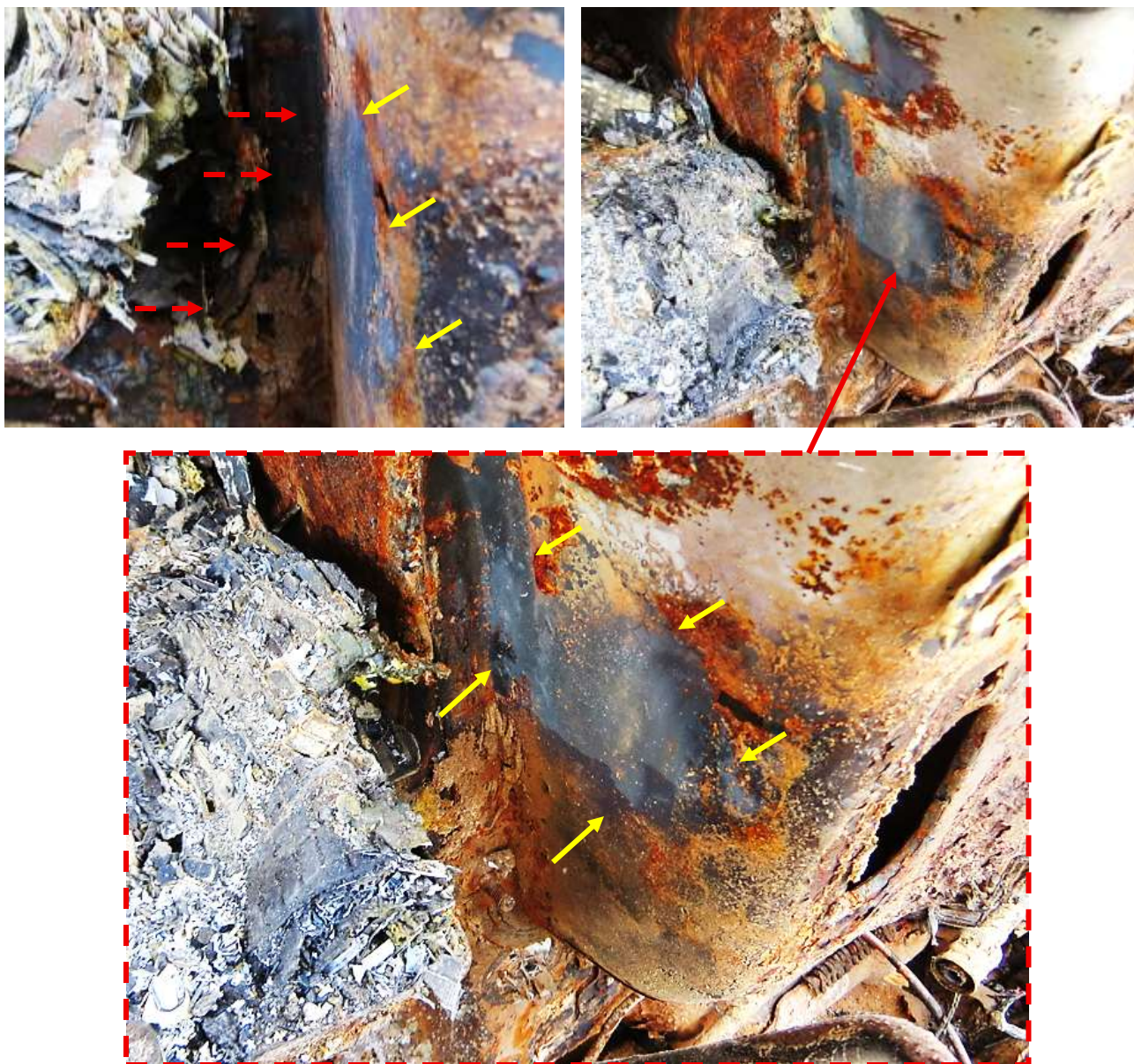


Figura 32 e 33 – Setas amarelas mostram estrutura metálica do veículo (sistema de ar), com evidências de ferrugem por toda parte e mudanças de cor, azulada notável na chapa metálica. Essa cor comprova que a área foi exposta a altas temperaturas vindas de uma fonte de calor externa próxima (**setas vermelhas tracejadas**).

Essa coloração azulada é um sinal comum de oxidação na superfície causada pelo calor (formando camadas de óxidos de ferro e outros metais), e geralmente aparece quando a temperatura está entre **250–320 °C) = radiação térmica da bateria, não chama direta**. Essa faixa de temperatura é típica de reações que liberam calor em baterias de chumbo-ácido que estão com problemas internos, como um curto-circuito ou uma reação descontrolada do ácido sulfúrico com materiais que conduzem eletricidade.

O padrão de queima e os aspectos de escória vítrea, associados à presença de pérolas de chumbo, indicam temperaturas internas superiores a 600 °C, próximas à área azulada. Em conjunto com a presença de sujidade e danos estruturais, esses elementos confirmam a ocorrência de calor mais intenso com origem no compartimento da bateria. O calor propagou-se para a chapa metálica, provocando oxidação azul-acinzentada e, posteriormente, a fusão parcial da camada superficial.

Não encontramos nada que indique que houve chamas diretamente ou que algo foi usado para acelerar o fogo. Isso sugere que o aquecimento começou de dentro para fora, o que faz sentido se pensarmos em uma reação química descontrolada ou no calor gerado por um curto-circuito.

7.1 DO VEÍCULO RENAULT/MEGANEGT DYN 20A DE COR CINZA



Figura 34 a 39 – Mostram panorâmica do capô e laterais direita e esquerda, sendo constatado danos por queima e laminação seca, com concentração do lado direito.

7.2 DO CABO NEGATIVO



Figura 40 a 42 – Setas vermelhas mostram soquete negativo, apresentando ponto de fusão na parte interna por fragmentos do polo, e fiações com dano por queima e modificação da coloração.

7.3 DA BATERIA



Figura 43 e 44 – Setas vermelhas mostram bateria, a qual apresenta danos severos por queima. Evidencia-se que o vaso **correspondente ao polo negativo** encontra-se completamente derretido, em decorrência da ação térmica interna, associada a processo de superaquecimento e sobrecarga elétrica. Tal condição é compatível com falha eletroquímica interna, capaz de gerar elevação acentuada de temperatura, degradação do invólucro polimérico e liberação de energia térmica suficiente para a fusão total da estrutura.

Análise técnica de danos por queima e falha térmica

Evidenciou-se componente **eletromecânico severamente danificado por ação térmica intensa**, apresenta **derretimento generalizado do invólucro**, colapso estrutural e **exposição dos elementos internos metálicos**, os quais se encontram deformados, escoriados e parcialmente fundidos. O aspecto vitrificado, com acúmulo de resíduos solidificados, indica **temperaturas elevadas e sustentadas**, superiores aos limites de operação do material isolante e dos metais constituintes.

Observa-se **padrão de queima concentrado e delimitado**, com **escoamentos solidificados e orientação predominante de cima para baixo**, compatíveis com **fusão térmica seguida de ação gravitacional** durante o evento de incêndio. Esse padrão sugere **fonte térmica localizada e de alta energia**, típica de **sobreaquecimento elétrico, sobrecarga, curto-circuito interno ou falha eletromecânica progressiva**, culminando na ignição e propagação do fogo.

A presença de **condutores expostos, deformados e recozidos** é compatível com **elevação excessiva de corrente elétrica**, gerando aquecimento resistivo (efeito Joule), seguido de **perda das propriedades mecânicas e isolantes**. O conjunto dos vestígios é tecnicamente compatível com **falha interna como ponto de origem**.

7.4 DA CONTAMINAÇÃO QUÍMICA



Figura 45 a 47 – Setas vermelhas mostram placas positiva e negativa, com vestígios compatíveis com **falha eletroquímica severa na bateria chumbo-ácido**, associada a **sobrecarga elétrica**. As **placas positiva e negativa** apresentarem **danos por queima, fragmentação e pontos de fusão** indica que o sistema foi submetido a

correntes acima do regime nominal, gerando aquecimento resistivo (efeito Joule) e intensificação das reações eletroquímicas internas.

A **contaminação do eletrólito** e referente as impurezas metálicas e degradação do eletrólito (ácido sulfúrico) favorecem **reações parasitas**, aumento da **taxa de gaseificação**, elevação da temperatura interna e **instabilidade eletroquímica**. Esse cenário conduz à **formação excessiva de sulfato de chumbo (PbSO_4)**, observado como **depósito esbranquiçado**, típico de **sulfatação avançada**, condição que aumenta a resistência interna e agrava o aquecimento.

O **óxido de chumbo (PbO/PbO_2)**, associado à coloração **amarelada**, é compatível com **processos oxidativos intensificados** na placa positiva sob **sobrecarga**, nos quais o excesso de potencial promove degradação do material ativo. A coexistência de **PbSO_4 e óxidos de chumbo** indica **desequilíbrio eletroquímico severo**, com perda da reversibilidade das reações normais de carga/descarga.

Os **pontos de fusão e fragmentação das placas** (setas vermelhas tracejadas) mostram que a temperatura interna ultrapassou os limites térmicos do conjunto, caracterizando **evento exotérmico progressivo**, potencialmente evoluindo para **fuga térmica**, com liberação de energia para provocar **danos por queima** observáveis externamente. Assim, o conjunto de evidências é **cientificamente compatível** com **sobrecarga elétrica sustentada**, agravada por **contaminação do eletrólito**, culminando em **falha térmica e eletroquímica da bateria**.

7.5 DA FUGA TÉRMICA



Figura 48 a 50 – Setas vermelhas mostram bateria, apresentando danos severos por queima, sendo constatado derretimento entre os vasos/células. Tal condição é compatível com a ocorrência de reação exotérmica interna, promovendo processo de

fuga térmica, com dissipação abrupta de energia e consequente queima do conjunto, resultando na perda total da integridade estrutural da bateria.

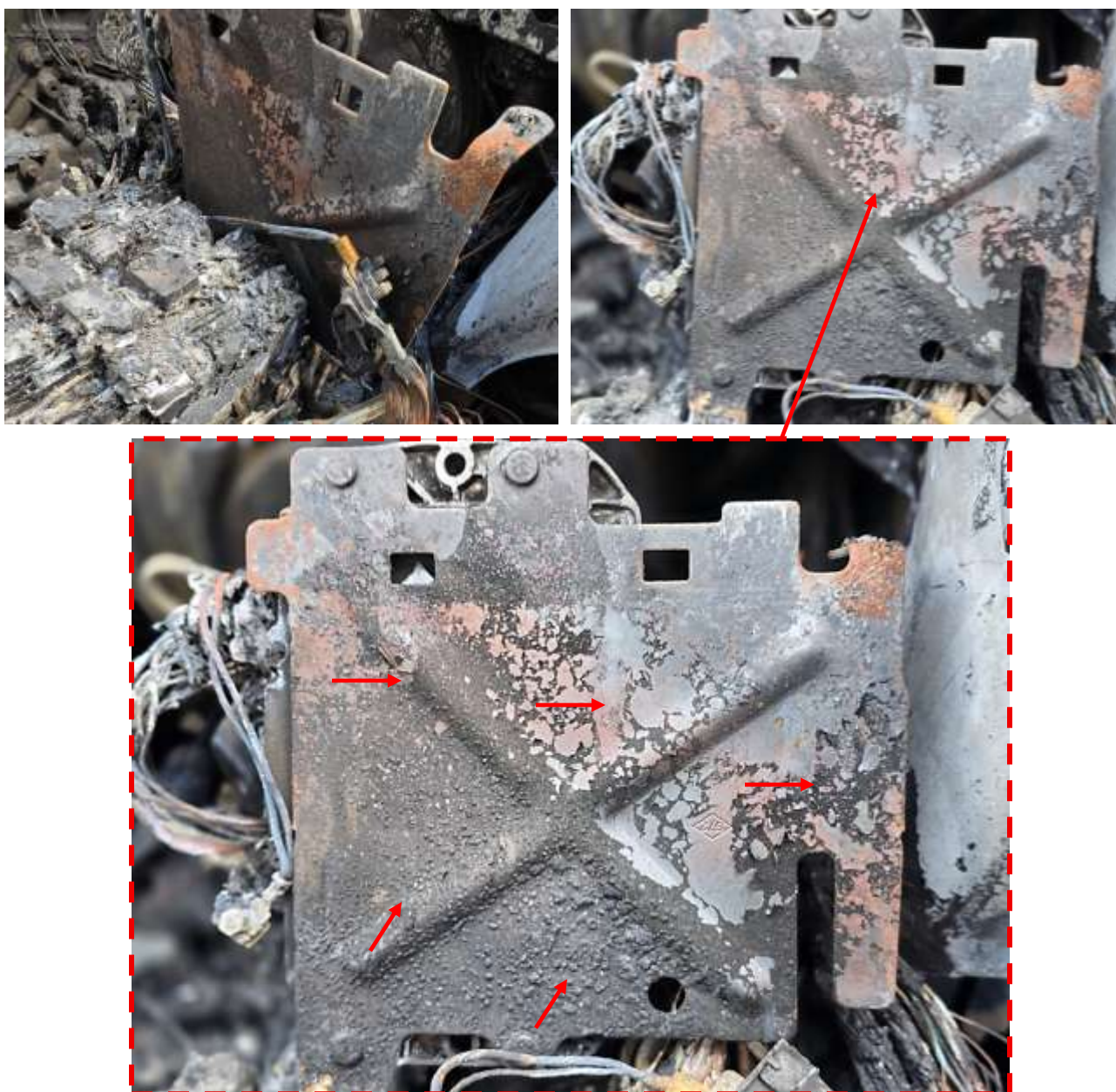


Imagem 51 e 52 – Setas vermelhas mostram chapa metálica de proteção da bateria apresentando danos por queima, com alterações **cromáticas progressivas**, destacando-se **tonalidades azuladas**, típicas de oxidação térmica de aços submetidos

a temperaturas elevadas e localizadas. Esse fenômeno indica exposição a patamares térmicos superiores aos de operação normal, compatíveis com aquecimento intenso e sustentado.

Observa-se padrão de degradação com orientação predominante de baixo para cima, caracterizado por gradiente térmico ascendente, compatível com propagação de calor por convecção. Tal orientação é **tecnicamente coerente com fuga térmica da bateria**, na qual **a liberação abrupta de energia térmica e gases aquecidos promove aquecimento ascensional da chapa adjacente.**

A presença de descascamento da pintura, escamação superficial e perda parcial do revestimento protetivo reforça a ocorrência de exposição direta a altas temperaturas, associada a reação exotérmica interna da bateria (**sobrecarga, curto-circuito interno ou falha eletroquímica**), resultando em dissipação energética intensa e danos térmicos no entorno imediato.

O conjunto dos vestígios é tecnicamente compatível com fonte térmica primária na bateria, atuando como foco de calor suficiente para provocar modificação metalúrgica superficial da chapa de proteção, sem evidências de aquecimento homogêneo externo, o que corrobora a hipótese de evento térmico endógeno (fuga térmica).

8 DA COMPARAÇÃO TÉCNICA



Fonte: FIAT/UNO MILLE WAY ECON DE COR FANTASIA



Fonte: Artigo Científico - [10.48021/978-65-270-7363-5-C2](https://doi.org/10.48021/978-65-270-7363-5-C2)

Imagens 53 a 56 - mostram compatibilidades técnicas de danos nas placas e vasos de bateria automotiva, resultantes da sulfatação decorrente das condições adversas em que o acumulador se encontrava após a descarga.

8.1. Sobre a Análise Técnica

A área esbranquiçada é formada por cristais de PbSO_4 , que englobam sulfatos, surgindo nas duas faces da placa no momento da imersão e durante o desenvolvimento da formação, progredindo da periferia para o centro.

8.1.2 Sulfatação e Liberação de Hidrogênio

A literatura da área indica que, com o tempo ou por uso INCORRETO, a bateria passa por um processo de deterioração conhecido como sulfatação.

Broussely e Archdale (2004) apontam que, com o envelhecimento, as baterias chumbo-ácido passam por transformações químicas, como a produção de sulfato de chumbo (PbSO_4), a perda de água, o desgaste dos componentes e a solidificação do ácido.

Esse fenômeno se dá durante as reações químicas no interior da bateria. Nele, o sulfato de chumbo é liberado e pode gerar cristais nas placas de chumbo, prejudicando a capacidade de recarga da bateria, resultando em situações desfavoráveis com o passar do tempo (ciclos de carga e descarga) e curtos-circuitos por impurezas.

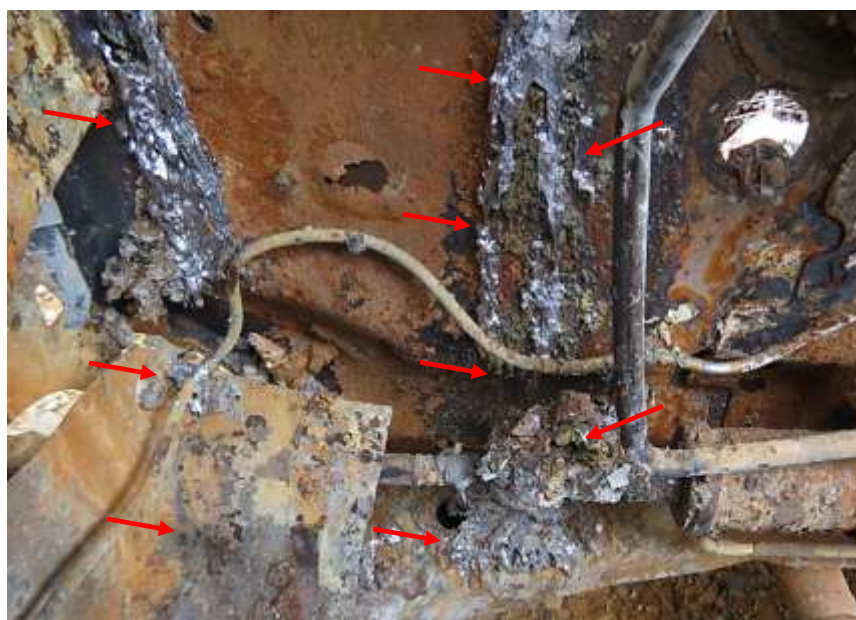
A formação de hidrogênio na superfície do eletrodo negativo ocorre quando moléculas de água se ligam à superfície do material metálico e, dependendo do potencial elétrico aplicado, forma-se hidrogênio atômico, que pode se espalhar pelo eletrólito ou ser absorvido na superfície e se juntar a outros átomos de hidrogênio, formando a molécula de H_2 (OLIVEIRA, 2018).

Como consequência do aumento na produção de gás, ocorre perda de água no eletrólito, levando a um aumento gradual na concentração de ácido sulfúrico durante os ciclos de carga e descarga. Segundo Palov et al. (2008), a durabilidade da bateria diminui com o aumento da concentração de ácido sulfúrico na solução. Esse aumento afeta diretamente o andamento das reações e a solubilidade do sulfato de chumbo,

prejudicando a eficiência de carga do dispositivo, causando expansão da estrutura e vazamentos que, em contato com aços comuns, geram cristalização.

As reações de liberação de hidrogênio são fortemente afetadas pela presença de impurezas no eletrólito.

8.1.3 Da análise Técnica e Científica – fusão das placas negativas de chumbo (sistema de bateria automotiva)



As **figuras 57 a 59** revelam a presença de fragmentos metálicos endurecidos, exibindo formas aleatórias e uma gama de cores que varia do cinza ao amarelado. A superfície desses resíduos é marcada por poros e bolhas, indicando que as placas de metal originalmente lisas sofreram um processo completo de derretimento.

Essas características comprovam que houve a fusão das placas negativas de chumbo (Pb), que fazem parte do interior de uma bateria automotiva do tipo chumbo-ácido. **A forma derretida e os sinais de calor intenso, acima do ponto em que o chumbo derrete (327,5 °C), apontam para oxidação e evaporação parcial do material.**

8.1.4 Exame Químico e Termodinâmico

Quando o chumbo metálico (Pb) é submetido a temperaturas que excedem seu ponto de fusão, ele passa por um processo de oxidação térmica ao entrar em contato com o oxigênio. Isso resulta na formação de óxidos de chumbo (PbO, PbO₂) e sulfatos (PbSO₄), principalmente quando há resíduos do eletrólito sulfúrico presentes.

8.1.5. Principais reações químicas observáveis:

- **$\text{Pb} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{PbO}$**
- **$\text{PbO} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{PbSO}_4$**
- **$\text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + \text{calor}$**

Essas reações liberam muita energia na forma de calor, o que ajuda a manter a queima ou o derretimento contínuo do material metálico ativo.

A cor branca e amarelada nas bordas das amostras sugere a formação de PbSO₄ e PbO confirmando que ocorreram processos químicos de oxidação e uma sulfatação térmica bem avançada.

8.1.6 Interpretação Térmica e Mecânica

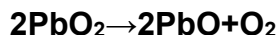
O fato das **placas negativas terem derretido completamente**, (coloração chumbo) junto com a presença de resíduos que parecem vidro e pontos de solidificação irregulares, indica uma liberação repentina de eletricidade de dentro da bateria. Isso geralmente acontece quando há um curto-circuito interno entre as placas, causado pelo rompimento do separador (normalmente feito de polietileno ou borracha ebonite).

As **placas positivas compostas** por material ativo de uma bateria de chumbo-ácido é principalmente **o dióxido de chumbo (PbO₂) (cor marrom)**, sustentado por uma grade de chumbo ou liga de chumbo-antimônio/chumbo-cálcio.

O dióxido de chumbo **não se funde com facilidade**, pois se decompõe **antes de atingir o ponto de fusão**.

Dióxido de chumbo (PbO₂): comportamento térmico

Decomposição térmica: ocorre aproximadamente entre **290 °C e 350 °C**, momento em que o PbO₂ inicia sua decomposição, conforme a reação:



Fusão do chumbo resultante: após a decomposição, o óxido de chumbo (PbO) ou o próprio chumbo metálico derretem a cerca de 327,5 °C.

Quando há sobrecarga elétrica ou arco interno, **as temperaturas locais podem facilmente passar de 400 °C até 600 °C**, levando a:

- A fusão das grades metálicas de chumbo;
- A liberação de oxigênio pelo óxido de chumbo (IV);
- A **incandescência ou até mesmo a ignição dos gases hidrogênio e oxigênio presentes dentro da bateria**.

8.1.6.1 Tabela de comparação

Componente	Fenômeno térmico	Temperatura aproximada
Dióxido de chumbo (PbO_2)	Decomposição térmica	290 °C – 350 °C
Óxido de chumbo (PbO)	Fusão	888 °C
Chumbo metálico (Pb)	Fusão	327,5 °C
Ligas Pb–Sb ou Pb–Ca (placas de grade)	Fusão	250 °C – 320 °C
Polímero da carcaça (PP/PE)	Amolecimento / ignição	130 °C – 350 °C

Fonte: Adaptado de *Pavlov (2011); Callister (2020); Carneiro et al. (2017); Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000); NFPA 921 (2024); SAE J1292 (2022)*.

8.1.7. Curto interno causa:

- Aumento repentino da corrente elétrica, que queima a proteção dos cabos grossos da bateria;
- Reação eletrolítica fora de controle (hidrólise e liberação de gases);
- Aumento da temperatura em pontos específicos (acima de 800 °C);
- Derretimento das placas e a expulsão de material derretido.

Curto interno → efeito Joule extremo → thermal runaway → eletrólise violenta da água → produção explosiva de $\text{H}_2 + \text{O}_2$ → aumento brutal de pressão → ruptura da carcaça + ignição do gás detonante (knallgas).

A observação do derretimento completo das placas negativas de chumbo (Pb derretido a 327,5 °C) e da decomposição térmica do PbO_2 (290–350 °C) com liberação de O_2 .

A presença de material que parece vidro (como escória) indica que parte do chumbo derretido reagiu com o ácido sulfúrico que sobrou, formando óxidos e sulfatos

complexos, o que aumentou ainda mais o aquecimento por causa de reações químicas adicionais.

8.1.8 Diagnóstico Técnico-Químico

Analisando a forma e os resíduos encontrados, podemos dizer que:

- O calor excessivo começou dentro da bateria, com energia suficiente para derreter completamente as placas de chumbo;
- As reações químicas de oxidação e sulfatação térmica mostram que houve uma combinação de energia elétrica (curto interno) e energia química (ácido da bateria);
- Esse evento levou ao colapso total da célula eletroquímica, transformando tudo em uma massa derretida e misturada de chumbo e óxidos metálicos.

As provas encontradas mostram que as placas negativas da bateria derreteram completamente por causa de uma reação termoquímica causada por um curto-circuito interno.

O processo começou quando os separadores se deterioraram, permitindo o contato direto entre as placas e a consequente descarga de alta intensidade, que causou:

- O derretimento total do metal ($\text{Pb} \rightarrow \text{Pb derretido}$);
- A formação de compostos oxidados e sulfatos (PbO , PbO_2 , PbSO_4);
- A expulsão de material quente e sua solidificação na superfície, formando uma espécie de escória.

Essa situação é consistente com uma falha térmica interna da bateria, que atuou como a principal causa do incêndio no veículo, de acordo com os protocolos de investigação da NFPA 921:2024, capítulo 26 – Incêndios em Veículos.

9 DA ANÁLISE LABORATORIAL

Da caracterização microestrutural e química de resíduos de placas de bateria chumbo-ácido

A caracterização integrada das amostras de placas de bateria foi conduzida através da correlação entre microscopia eletrônica e análises físico-químicas quantitativas, documentadas nos laudos técnicos **AFK4340/25** (AFINKO) e **42020/2025.0 / 42020/2025.0.A** (TECLAB).

1. Análise Microestrutural e Elemental (MEV-EDS)

Conforme detalhado no **Relatório de Ensaio AFK4340/25**, a análise via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciou uma morfologia superficial heterogênea na amostra (identificada como AFK258318), caracterizada pela presença de fissuras e partículas com geometrias distintas. Um dos objetivos centrais desta análise foi a investigação de "**pérolas de fusão**", estruturas esféricas características resultantes de processos térmicos, que podem ser observadas nas micrografias de maior magnitude.

A Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS) revelou que a matriz da amostra é composta majoritariamente por Chumbo (Pb) e Carbono (C), com teores residuais de Alumínio (Al) e Oxigênio (O). A distribuição elemental mostrou-se variável conforme a região analisada (Tabela 3 do laudo **AFK4340/25**):

- **Regiões ricas em Chumbo:** Os pontos A, C, E e F apresentaram concentrações massivas de Pb variando entre 90,50% e 92,15%, sugerindo a predominância de chumbo metálico ou fases pouco oxidadas nessas áreas específicas.
- **Regiões Carbonáceas:** O ponto B destacou-se por um teor elevado de Carbono (70,35%) e menor teor de Chumbo (24,17%), indicando possíveis resíduos de separadores poliméricos ou aditivos carbonáceos da placa.

2. Quantificação Química e Identificação de Espécies (ICP-OES / Gravimetria)

Para complementar a análise pontual do EDS, a caracterização global da amostra (Resíduo Sólido) foi realizada através dos laudos **42020/2025.0** e **42020/2025.0.A** do laboratório **TECLAB**, utilizando métodos da **Environmental Protection Agency (EPA)**.

Os resultados quantitativos demonstraram a presença significativa de espécies oxidadas e sulfatadas, fundamentais para compreender o estado de degradação das placas:

- **Chumbo Total:** O laudo **42020/2025.0.A** quantificou uma concentração de Chumbo de **4.711,4 mg/kg**, confirmando-o como constituinte primário de interesse ambiental e recuperação.
- **Óxido de Chumbo (PbO):** O laudo **42020/2025.0** identificou **5.088,36 mg/kg** de PbO. A detecção desta espécie corrobora a presença de material ativo oxidado, consistente com o funcionamento eletroquímico de acumuladores de chumbo-ácido.
- **Sulfatos:** A análise indicou **2.183,5 mg/kg** de sulfato. A presença de sulfatos é um indicativo químico direto do processo de sulfatação das placas, comum em baterias esgotadas ou submetidas a ciclos de descarga profunda.

3. Correlação dos Dados

A integração dos dados permite inferir que, embora a análise de superfície via EDS (Laudo **AFK4340/25**) tenha apontado baixos teores de oxigênio em pontos específicos (4,10% a 7,63%), a análise química de massa (Laudos **42020/2025.0**) revela que o chumbo não se encontra apenas em sua forma metálica, **mas significativamente associado a óxidos e sulfatos**. A detecção visual de estruturas esféricas ("pérolas") no MEV, combinada à alta concentração de PbO e sulfatos, **comprova que o material sofreu processos térmicos e eletroquímicos complexos**, resultando em uma mistura de **fases metálicas fundidas e produtos de corrosão/descarga**.



Fonte: Autor

Acesso aos laudos: <https://sl1nk.com/RL4hu>

10 RESULTADOS

A Tabela apresenta um resumo das observações obtidas através da análise visual e morfológica dos resíduos da bateria e da área circundante:

Elemento Analisado	Imagem de Referência	Dano Macroscópico Observado	Interpretação Pericial Presuntiva
Corrosão Externa e Resíduo	Imagem	Depósitos de material esverdeado/cinza e corrosão em superfícies adjacentes.	Vazamento/Vaporização de H₂SO₄: Reação do eletrólito ácido com metais veiculares, formando sais sulfato.
Placas Internas	Imagem 2	Estrutura laminar exposta, severamente	Dano Térmico e Mecânico Extremo: Fusão, oxidação e

Elemento Analisado	Imagem de Referência	Dano Macroscópico Observado	Interpretação Pericial Presuntiva
		deformada, calcinada e coberta por resíduos brancos/cinzentos.	colapso das placas. O aspecto em leque e a calcinação indicam alta temperatura e força de ruptura (explosão).
Integridade da Carcaça	Imagem (Inferida)	Ruptura e ausência de partes da carcaça plástica.	Pressão Interna Excessiva: Consistente com a detonação do gás detonante (H ₂ /O ₂).

Tabela 01: Sumário dos Achados Macroscópicos e Interpretações.

11 DISCUSSÃO

Os resultados oferecem evidências sólidas para a identificação do mecanismo de falha. A corrosão externa confirma a liberação do eletrólito ácido, sugerindo que a integridade do invólucro foi afetada, tanto por sobre pressão quanto por fusão térmica. O material **branco/cinzeno** identificado é compatível com **sulfato de chumbo** (PbSO₄) e **óxidos**, que são produtos da reação do material ativo sob altas temperaturas. Esses resultados fornecem evidências robustas para a determinação

A deformação severa e a calcinação das placas, representam o estágio mais destrutivo da falha. Esse grau de dano é consequência direta de uma fuga térmica provocada por sobrecarga (por exemplo, alternador com regulador de tensão defeituoso, não atendendo à ABNT NBR 15940) ou curto-circuito de alta corrente. A eletrólise descontrolada, resultou na fuga térmica, fez com que o gás detonante se acumulasse. A

explosão que rompeu a carcaça e desintegrou as placas foi provocada pela ignição desse gás, causada pelo calor ou faísca do curto-circuito.

O caso em análise está de acordo com os relatórios periciais que apontam a ignição do gás hidrogênio como o evento final em falhas de baterias de chumbo-ácido (NUVEM, 2025), onde o **estudo destaca a natureza exotérmica e o risco associado à má manutenção da bateria e do sistema de carga.**

12 CONCLUSÃO / CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise química e estrutural dos resíduos da bateria de chumbo-ácido comprovou que a falha surgiu devido a um curto-circuito interno, ocasionado pela degradação simultânea das placas eletroquímicas (tanto positivas quanto negativas) e do eletrólito de sulfato de hidrogênio (H_2SO_4). Esse evento provocou uma perda na integridade do sistema eletroquímico, resultando em um fenômeno de fuga térmica, que foi identificado como a principal causa do incidente.

Esse mecanismo está intimamente relacionado a condições operacionais anômalas, como sobrecarga elétrica, curtos-circuitos prolongados e a ausência de manutenção preventiva, que elevaram gradualmente a taxa das reações eletroquímicas exotérmicas. A energia em desequilíbrio gerada causou um aumento contínuo na temperatura interna da bateria, superando a capacidade de dissipação de calor que o sistema possuía.

Os resultados da investigação indicam uma correlação direta entre os danos materiais observados, como corrosão intensa, desintegração estrutural e fusão das placas negativas, e processos significativos de gaseificação, eletrólise da água e reações redox exotérmicas, que foram responsáveis pela rápida liberação de energia térmica e pela propagação das chamas.

A análise detalhada dos sinais visuais, dos princípios da eletroquímica em sistemas de chumbo-ácido e das reações térmicas observadas leva a uma conclusão com um elevado grau de certeza científico-técnica, que o incêndio teve como origem uma falha interna na bateria, caracterizada por um curto-circuito entre os componentes condutores, agravada pela falta de inspeções e manutenção regular.

As repetidas descargas elétricas ligadas às reações exotérmicas do eletrólito de sulfato causaram a fusão das placas de chumbo, o derretimento dos terminais metálicos e, por consequência, a ignição dos gases combustíveis, resultando na propagação do fogo pela área superior do compartimento do motor.

Ao considerar a perspectiva química, a bateria evidenciou uma falha eletroquímica e térmica severa, o que levou à liberação imediata de energia elétrica e química. A interação entre o ácido sulfúrico e os eletrodos metálicos resultou na liquefação completa das placas negativas e na conversão dos terminais metálicos em estado líquido. O calor gerado foi suficiente para iniciar e sustentar a combustão dos materiais circundantes, confirmando com clareza que a bateria foi a fonte inicial do incêndio.

Sob a ótica da Química e da Termodinâmica, o sistema de chumbo-ácido perdeu a estabilidade termodinâmica quando a taxa de produção de calor, resultante das reações redox ou oxirredução, do eletrólise da água e da oxidação do chumbo, excedeu a habilidade de dissipação de calor. Esse desequilíbrio resultou em um processo autocatalítico, em que a temperatura interna subiu rapidamente a níveis capazes de:

- **Derreter completamente as placas negativas de chumbo;**
- **Decompor o dióxido de chumbo das placas positivas, liberando oxigênio;**
- **Produzir quantidades consideráveis de hidrogênio, criando uma mistura explosiva, aproximar-se rapidamente da ruptura do invólucro e ignição.**

As evidências físico-químicas encontradas, como sulfatação avançada, formação de óxidos e sulfatos, pérolas metálicas, escória vítrea e oxidação térmica do aço adjacente, demonstram de maneira inequívoca que a origem primária da energia veio da bateria, afastando a hipótese de ignição externa ou o uso de agentes acelerantes.

Sob uma visão científica e técnica, conclui-se que a bateria operou como um reator eletroquímico sob condições incontrolláveis, liberando energia elétrica e química de forma abrupta, o que foi suficiente para iniciar e sustentar um incêndio em um veículo. O evento se encaixa perfeitamente nos critérios normativos de **fuga térmica** em sistemas de chumbo-ácido, conforme descrito na literatura especializada e nas diretrizes regulamentares relevantes NFPA 921, SAE J1292 e referências de eletroquímica aplicada.

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15940: Baterias chumbo-ácido para uso em veículos rodoviários automotores de quatro ou mais rodas – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

BERNDT, D. Maintenance-Free Batteries: Lead-Acid, Nickel/Cadmium, Nickel/Metal Hydride. 2. ed. Taunton: Research Studies Press, 2001.

BODE, H. Lead-Acid Batteries. New York: Wiley-Interscience, 1977.

BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. Química Nova, v. 23, n. 1, p. 9–23, 2000.

BROUSSELY, M.; ARCHDALE, G. Li-ion batteries and portable power source prospects for the next 5–10 years. Journal of Power Sources, v. 136, p. 386–394, 2004.

CALLISTER, W. D. Jr. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2020.

CARNEIRO, R. L. et al. Aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 3, p. 889–911, 2017.

DUARTE, A. M. Análise dos processos de corrosão em placas positivas de baterias automotivas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16750-2: Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Geneva, 2012.

LAM, L. T. Effects of additives on the performance of lead-acid batteries. Journal of Power Sources, v. 88, p. 1–8, 2000.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. Handbook of Batteries. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2011.

MAHATO, B. K. et al. Trace metals in lead alloys and their influence on battery performance. Journal of The Electrochemical Society, v. 130, n. 5, p. 1001–1006, 1983.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. Quincy, MA: NFPA, 2024.

NUVEM, W. S. Perícia de incêndio veicular por falhas em baterias automotivas: análise dos impactos de danos mecânicos, deficiências de fixação e negligência na manutenção. São Paulo: Editora Dialética, 2025.

OLIVEIRA, C. P. Falhas em sistemas elétricos automotivos e riscos de ignição. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

PAVLOV, D. Lead-Acid Batteries: Science and Technology. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2011.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J1292: Automotive Wiring, Terminals, and Connectors – Electrical Performance and Fire Risks. Warrendale, PA: SAE International, 2022.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J1637: Electrical Terminal Conductivity and Joint Resistance Testing. Warrendale, PA: SAE International, 2016.

TOTTEN, G. E. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2006.



REVISTA BRASILEIRA DE INCÊNDIOS

Revista Técnica Da Ciência Do Fogo

Artigo Publicado Vol. 01 – Primeira Edição 05 janeiro 2026 – ISSN 3086-0539

Versão online www.revistabrasileiraincendios.com.br

BOSCH. Curso Bateria Automotiva I e II. Material técnico interno.

EMPRESA K M. Curso de Recondicionamento de Baterias e Análise de Falhas. São Paulo.