



II CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Aspectos de Falha e Confiabilidade de Baterias Chumbo-Ácidas Automotivas

Cesar Miguel Bandeira Junior

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aldo Braghini Junior

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: Este artigo avalia a confiabilidade e os modos de falha de baterias chumbo-ácidas utilizadas em aplicações automotivas, com foco em veículos comerciais pesados. A metodologia adotada combina revisão bibliográfica, voltada à identificação dos modos de falha mais recorrentes e fundamentos de confiabilidade, com um estudo de caso baseado na análise de 86 processos de garantia de uma montadora nacional. Foram empregadas ferramentas estatísticas, como o diagrama de Pareto e a distribuição de Weibull, para classificar as falhas e estimar parâmetros de vida útil. Os resultados demonstram que 74% das ocorrências não estão associadas a defeitos de fabricação, mas a condições operacionais e uso inadequado. Três modos de falha imprevistos concentram 82,7% dos casos analisados: corrosão em uso, bateria descarregada e bateria ciclada. A análise de confiabilidade mostrou que, mesmo entre falhas não cobertas por garantia, a durabilidade das baterias esteve dentro dos limites esperados. A avaliação do parâmetro de forma (β) indicou que falhas por descarregamento tendem a aumentar com o tempo de uso, enquanto corrosão e ciclagem se caracterizam como falhas precoces. Esses achados revelam mecanismos distintos de falha, exigindo abordagens diferenciadas de mitigação, desde o aprimoramento do diagnóstico técnico até a orientação dos usuários quanto ao uso adequado do sistema elétrico.

Palavras-chave: Automotivo, Bateria, Confiabilidade, Weibull

Failure and Reliability Aspects of Automotive Lead-Acid Batteries

Abstract: This article evaluates the reliability and failure modes of lead-acid batteries used in automotive applications, focusing on heavy commercial vehicles. The methodology adopted combines a literature review, aimed at identifying the most recurrent failure modes and reliability fundamentals, with a case study based on the analysis of 86 warranty claims from a national automaker. Statistical tools, such as the Pareto chart and Weibull distribution, were used to classify failures and estimate service life parameters. The results show that 74% of occurrences are not associated with manufacturing defects, but with operating conditions and improper use. Three types of unfounded failures account for 82.7% of the cases analyzed: corrosion in use, dead battery and cycled battery. The reliability analysis showed that, even among failures not covered by warranty, battery durability was within expected limits. The evaluation of the shape parameter (β) indicated that failures due to discharge tend to increase with time of use, while corrosion and cycling are characterized as early failures. These findings reveal distinct failure mechanisms, requiring different mitigation approaches, from improving technical diagnosis to guiding users on the proper use of the electrical system.

Keywords: Automotive, Battery, Reliability, Weibull.

1. Introdução

Baterias automotivas possuem uma demanda crescente no mercado mundial, seja para aplicação em projetos de eletrificação veicular ou em usos já consagrados de sistemas de iluminação e partida. Neste caso, as baterias serão sempre do tipo secundárias, ou seja, baterias que podem passar por um processo de recarga (PAVLOV, 2011).

Embora novas tecnologias já estejam disponíveis e sejam promissoras para o futuro, como baterias de íon de lítio, as baterias de chumbo continuam sendo as mais comuns em redes de alimentação de baixa tensão automotiva (BAHADUR et al., 2018). Milhões de veículos ainda dependem delas, e essa tecnologia deve permanecer em uso em veículos convencionais no curto prazo (CONRADT et al., 2023). Baterias chumbo-ácidas podem ser manufaturadas em uma grande variedade de capacidades e designs, sendo a principal escolha no mercado com motores a combustão (BENNETT, 2011).

As baterias chumbo-ácidas foram uma conquista fenomenal da engenharia de seu tempo. Sendo uma fonte secundária de energia, era um grande desafio técnico gerar a energia que seria posteriormente armazenada. Nos primórdios estas baterias chumbo-ácidas eram carregadas com o uso de células de Daniell ou Bunsen, estas sim fontes primárias de energia (PAVLOV, 2011). Conceitualmente não há grandes diferenças entre os primeiros modelos de baterias e suas versões contemporâneas, pois mantém-se o conceito de um conjunto de células / eletrodo / eletrólito que sofrerá oxirredução (BENNETT, 2011).

O uso de baterias chumbo-ácidas aumentou imensamente após a Segunda Guerra Mundial, estimulada pelo rápido desenvolvimento das indústrias de automóveis, transportes e comunicações. Conforme a aplicação desejada, as baterias chumbo-ácidas podem ser classificadas em alguns tipos principais, sendo a aplicação automotiva tradicional denominada SLI (*starting, lighting, ignition*), em referência ao uso esperado desta bateria em um automóvel (partida, iluminação e ignição). Em relação à sua configuração de caixa, as baterias podem ser, entre outras opções, seladas (VRLA Valve Regulated Lead Acid Batteries) ou com rolhas (PAVLOV, 2011).

Durante a operação normal, o alternador em veículos convencionais de combustão, ou o conversor DC-DC em veículos elétricos, trabalham em conjunto com a bateria de 12V. Juntos, eles fornecem a energia necessária para a rede de alimentação. No entanto, se o componente principal para o fornecimento contínuo de energia falhar, então a bateria de 12V deve fornecer toda a alimentação de energia demandada pelo veículo (CONRADT et al., 2023). Estas falhas em outros sistemas aumentam as exigências sobre a bateria, tornando-a mais susceptível a ocorrência de falhas.

Independentemente da carga ou do tipo de aplicação, há uma demanda energética que precisa ser atendida pela bateria instalada no veículo. Em veículos comerciais pesados o não atendimento desta demanda gera inconvenientes à operação de transporte, com significativos impactos econômicos em toda cadeia logística. O correto entendimento do desempenho de um componente em relação a suas expectativas de confiabilidade ajuda na compreensão de eventuais falhas, promovendo o embasamento técnico necessário para tomada de decisões assertivas. Este artigo busca contribuir com o entendimento da análise de falhas em baterias ao abordar os fundamentos da engenharia de confiabilidade necessários para correta avaliação e tratamento adequado dos dados.

Para atingir estes objetivos há a divisão em cinco seções. A primeira (Introdução), descreve o tema, o problema e os objetivos. A segunda seção expõe a metodologia adotada para a construção da pesquisa. A terceira seção relata um apanhado da revisão teórica necessária para entendimento dos elementos do trabalho. Na quarta seção são demonstradas aplicações dos elementos de avaliação discutidos através de um estudo de caso. Por fim, a última seção descreve as principais conclusões do artigo.

2. Metodologia

A condução deste estudo apoiou-se em uma Revisão Sistemática da Literatura, conduzida segundo o protocolo *Methodi Ordinatio* (Pagani; Kovaleski; Resende, 2015). O método organiza um portfólio bibliográfico a partir de três dimensões - ano de publicação, fator de impacto e número de citações - e é operacionalizado em nove etapas: (1) delimitação da questão de pesquisa; (2) busca preliminar nas bases de dados para mapeamento de termos; (3) ajuste dos descritores e definição das bases a serem empregadas; (4) execução da busca definitiva; (5) aplicação de filtros para elegibilidade dos estudos; (6) levantamento dos indicadores (fator de impacto, ano e citações); (7) ranqueamento dos trabalhos por meio da fórmula InOrdinatio 2.0; (8) obtenção dos textos completos; e (9) leitura crítica e análise sistemática do material selecionado.

A pesquisa foi conduzida em novembro/25 e teve como objetivo identificar artigos que abordassem as falhas em baterias chumbo-ácidas. O portfólio de artigos foi obtido através da verificação das seguintes bases de dados: Web of Science, Scopus, Scielo Brasil. Os documentos considerados na pesquisa foram artigos de pesquisa e artigos de revisão, escritos em qualquer idioma e sem aplicação de um recorte temporal. A busca pelas palavras-chave foi conduzida no resumo dos artigos. Os resultados foram organizados com o uso do *software* JabRef. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos durante pesquisas para definição das palavras-chave, feita através de buscas preliminares. Após a avaliação inicial as palavras-chave e booleanos para pesquisa foram definidos como ("battery" OR "batterie*") AND ("lead" AND "acid") AND ("reliability" OR "failure*") AND ("automotive"), também indicados na Tabela 1, com um total de 40 artigos obtidos para esta combinação. Após o processo de filtragem descrito na Tabela 2, um total de 23 artigos foi obtido como portfólio de pesquisa.

Tabela 01 – Combinação de palavras-chave

Combinação de palavras-chave	Web of Science	Scopus	Scielo Brasil
("battery" OR "batterie*") AND ("reliability" OR "failure*")	16.640	19.738	129
("battery" OR "batterie*") AND ("lead") AND ("reliability" OR "failure*")	1.304	2.143	3
("battery" OR "batterie*") AND ("lead" AND "acid") AND ("reliability" OR "failure*")	330	436	2
("battery" OR "batterie*") AND ("lead" AND "acid") AND ("reliability" OR "failure*") AND ("automotive")	22	18	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Processo de filtragem dos documentos

Filtragem dos documentos	Número de documentos
Total de documentos	40
Eliminação de duplicatas	10
Eliminação por tipo de documento	0
Eliminação por leitura (sem relação com o tema)	3
InOrdination <50	2
Total de artigos eliminados	17
Total de artigos no portfólio	23

Fonte: Autoria Própria (2025)

Para mapear a extensão e a natureza da pesquisa disponível sobre o tema foi conduzida uma avaliação sobre os resultados do processo de pesquisa. Esta avaliação foi feita através da exportação dos resultados de pesquisa para planilha eletrônica e leitura dos resumos destes trabalhos, identificando desta forma os que possuíam maior afinidade com a temática. Os artigos selecionados são citados neste trabalho.

O estudo de caso apresentado foi conduzido em cooperação com uma montadora nacional de caminhões, utilizando dados históricos de seus processos de garantia e com intenção de se avaliar o desempenho das baterias aplicadas em seus veículos. A frota utilizada para

avaliação é formada por caminhões-tratores pesados (peso bruto total acima de 16 toneladas). Características gerais desta frota são apresentadas abaixo:

- 10.185 veículos, com 02 baterias aplicadas por veículo (total de 20.370 baterias);
- dados heterogêneos, formados por uma mistura de categorias de aplicação distintas;
- monitoramento das falhas apenas dentro do período de cobertura garantia ao qual a bateria é englobada, ou seja, 12 meses após a entrega do veículo ao proprietário;
- sem monitoramento do estado de saúde da bateria, condições consideradas no estudo são apenas “falha” e “não falha”.

Os dados utilizados mesclam informações de três diferentes bancos de dados:

- a) um contém informações sobre os veículos e suas especificações;
- b) outro contém informações variáveis sobre sua utilização;
- c) o terceiro contém informações sobre a ocorrência de processos de garantia.

Informações se os veículos apresentaram ou não falhas em suas baterias são extraídas com o processamento destes dados. A frota em avaliação foi exposta a um total de 86 solicitações de garantia envolvendo baterias, quantidade que foi integralmente utilizada nesta avaliação. Em todas as situações foi conduzida uma investigação detalhada pelo fabricante da bateria, que recebeu o material reclamado em suas instalações para avaliação. O processamento desta análise inclui a execução de testes elétricos e desmontagem para avaliação interna, possibilitando a identificação da causa raiz das falhas e sua classificação como procedentes (responsabilidade do fabricante) ou improcedentes (responsabilidade do cliente).

Após as informações referentes aos processos de falha e da frota serem colhidas foi realizada a análise dos dados gerados. Estes dados abrangem tanto ocorrências aprovadas pela montadora como também os processos de garantia que foram recusados após discussão com o fabricante da bateria, separando assim a população avaliada em duas classes: casos procedentes e improcedentes. Os casos em que a responsabilidade da falha foi reconhecida pelo fabricante foram tratados individualmente e receberam o tratamento adequado para resolução da falha. Os casos que foram considerados improcedentes, que não possuem uma tratativa para correção do modo de falha pelo fabricante, foram então avaliados sob o enfoque da confiabilidade para se entender o seu comportamento. Como ferramenta estatística para avaliação da confiabilidade foi aplicada a distribuição Weibull, com intuito de identificar se os modos de falha apresentados atingem as expectativas de vida definidas para o produto. A análise da distribuição de Weibull foi conduzida com uso do software SuperSmith® Weibull, da empresa norte-americana Fulton Findings. Para preservação de informações confidenciais da companhia um fator foi aplicado aos dados, porém sem alterar o comportamento observado no estudo. A avaliação do Pareto das falhas foi feita com o uso do software Minitab®, da Minitab Inc.

3. Referencial Teórico

3.1 Falhas em Baterias

Parâmetros de operação influenciam significativamente a vida útil de uma bateria chumbo-ácida. Os modos de falha através dos quais uma bateria eventualmente falha irão depender grandemente da qualidade do item, do tipo de aplicação onde esta bateria opera e do grau de manutenção que o material recebeu ao longo de sua vida útil (CULPIN; RAND, 1991). Fatores como a profundidade de descarga (o quanto a bateria é descarregada durante o uso), a quantidade de ciclos de carga/recarga a que está submetida, eficiência da bateria, taxa de carga e descarga, temperatura de operação e capacidade da bateria são alguns parâmetros que impactam a durabilidade do componente (BUDIMAN *et al.*, 2025).

Os modos de falha que baterias chumbo-ácidas apresentam dependem do tipo de aplicação e de detalhes construtivos. Os modos de falha e tempos até a falha são influenciados por parâmetros internos (ex.: materiais, manufatura ou design) e externos (ex.: número de ciclos, profundidade da descarga, temperatura de operação). Se a bateria é corretamente utilizada e mantida em boas condições, seu uso poderá se estender consideravelmente, com uma vida média variando entre dois e sete anos (MURARI *et al.*, 2025).

Ainda é necessário fazer uma distinção entre falha catastrófica, caracterizada pela perda repentina da capacidade da bateria de funcionar, e falha progressiva, que tem como característica um súbito desvio da performance ótima (CULPIN; RAND, 1991).

Dentre os tipos de falhas comumente encontradas em baterias chumbo-ácidas aplicadas em veículos comerciais pesados e que usualmente são consideradas improcedentes durante uma avaliação de garantia pelo fabricante pode-se citar: corrosão em uso, descarregada, clicada, sulfatada, sobrecarga, curto-circuito e dano mecânico.

a) corrosão em uso: refere-se ao processo de degradação do eletrodo positivo da bateria, causada pela conversão do chumbo metálico em dióxido de chumbo (PbO_2). A corrosão leva ao aumento da resistência interna da bateria e redução do material ativo no eletrodo (OLIVEIRA, 2008). Essa falha ocorre quando a bateria é submetida a aplicações fora de sua capacidade nominal, com ciclos profundos de descarga que aceleram a corrosão das placas e grelhas, mesmo em períodos curtos de uso. Como consequência, a capacidade de carga é reduzida progressivamente até o ponto em que a bateria deixa de aceitar recarga e perde a capacidade de partida. Nas fases iniciais, o crescimento da corrosão é lento ou imperceptível, mas torna-se constante à medida que os produtos da reação se acumulam e a seção da grelha se torna mais fina (CULPIN; RAND, 1991);

b) baterias descarregadas: esta condição gera falhas em que ocorre a perda de disponibilidade do veículo, uma vez que não é possível dar partida no motor a combustão. Uma das principais funções de baterias chumbo-ácidas em aplicações automotivas é a partida do motor, porém o uso de energia para outras funcionalidades pode levar ao esgotamento das reservas (VORONOV; KRYSANDER; FRISK, 2020). Esta indisponibilidade, porém, não ocorre devido a uma falha em qualquer componente da bateria. A bateria encontra-se sem defeito e volta a operar normalmente após o processo de recarga. A opção pela troca do componente ao invés da recarga indica uma falha no diagnóstico durante atendimento do concessionário;

c) baterias cicladas: este modo de falha representa baterias que sofreram degradação no material ativo do eletrodo positivo. Ao passarem pelo processo repetitivo de carga e descarga durante sua vida útil, ocorre o desprendimento de material ativo da grade e consequente redução no desempenho elétrico. O material ativo do eletrodo positivo tende a perder sua resistência mecânica quando ocorrem ciclos repetidos de descarga/carga, porque os processos alternados de dissolução e precipitação convertem sua estrutura aglomerada em um acúmulo de cristais finos. Assim, o material ativo sofre degradação e parte dele pode cair da placa na forma de partículas finas. Esse processo é o que se chamou de desprendimento (BERNDT, 2011). Entende-se que a vida útil de uma bateria é medida através do número de ciclos (sequências de cargas e descargas) que a bateria foi projetada para suportar (LINDEN; REDDY, 2002). Baterias expostas a uma rotina de trabalho onde estes ciclos de carga e descarga são mais frequentes atingem com maior velocidade o número de ciclos determinados como a duração da vida, entrando então em colapso (OLIVEIRA, 2008). Pode ser causada por um desequilíbrio do sistema elétrico do veículo ou uma aplicação fora dos padrões específicos para a bateria, acima da sua capacidade. O acúmulo de consumidores e o uso inapropriado de alguns itens de consumo com o veículo desligado também podem colaborar para uma aceleração na degradação da massa ativa positiva, antecipando o fim da vida útil;

d) sulfatação da bateria: é decorrente da recristalização dos cristais de $PbSO_4$ em grânulos de $PbSO_4$ (aumento do tamanho dos cristais). Este processo ocorre quando a bateria é exposta a longos períodos em baixa carga, com a redução dos volumes de eletrólito e de chumbo. De forma proporcional, a capacidade de carga e de fornecimento de energia sofre uma redução até que o material não consiga mais acumular carga, levando a inutilização total da bateria (OLIVEIRA, 2008). Algumas motivações usuais são bateria inativa, veículo parado por muito tempo e ou gerador de tensão gerando abaixo do especificado. Nesta condição a bateria permanece em trabalho com uma tensão baixa e o alternador não consegue carregá-la plenamente, gerando um fenômeno denominado estratificação ácida. O ácido sulfúrico gerado durante o processo de carregamento da bateria tende a descer para o fundo da célula, gerando um gradiente de concentração vertical. Como o tempo este fenômeno gera uma maior dificuldade de recristalização do $PbSO_4$ no fundo do que no topo da célula, favorecendo a sulfatação (CULPIN; RAND, 1991);

e) sobrecarga é um efeito causado por uma situação que mantém uma corrente alta passando pela bateria por um longo período. Este período pode ser contínuo ou com interrupções (efeito acumulativo). Um dos principais efeitos da sobrecarga é a evaporação do eletrólito, fazendo a bateria operar com níveis inadequados de eletrólito. Mesmo uma pequena perda de eletrólito pode causar uma grande perda na performance da bateria, o que eventualmente pode levar a uma perda de função (CULPIN; RAND, 1991). Esta condição causa a elevação de temperatura do conjunto, levando a um sintoma clássico de baterias que passaram por sobrecarga: a deformação na caixa, geralmente construída em polipropileno. A sobrecarga está associada a uma situação externa (sistema elétrico defeituoso ou uso indevido), não tendo relação com um defeito de fabricação da bateria;

f) curto-circuito ocorre a bateria é exposta a um processo de carregamento incorreto, o que leva a um aporte de corrente superior à capacidade dos componentes (polos, separadores). É apontado por Linden e Reddy (2002) como uma das causas mais comuns para falhas em baterias;

g) dano mecânico: diferentes tipos de danos mecânicos podem afetar o desempenho e a vida de baterias. Alguns exemplos deste tipo de dano são polos danificados e rachaduras na caixa da bateria. Danos nos polos são relacionados a impactos diretos sobre o componente ou fixação incorreta dos terminais, situações que levam a deformações e perda de material no componente. Já trincas e batidas na caixa possuem relação direta com a fixação da bateria sobre a estrutura do veículo. Situações em que a bateria não está adequadamente presa ao veículo geram uma maior intensidade nas vibrações que são transmitidas à bateria, levando a quebras e trincas.

Os mecanismos de falha e de envelhecimento de baterias chumbo-ácidas são interdependentes. Por exemplo, baterias que passaram por corrosão em uso podem apresentar uma degradação maior da massa ativa, levando a ciclos mais curto de carga e descarga (bateria ciclada). Os tipos de falha também variam conforme o tipo da bateria, sendo que baterias do tipo VRLA degradam devido a sulfatação da massa ativa e perda de água por não permitem manutenção (JUNG, 2016). Um dos maiores desafios durante a avaliação de solicitações de garantia é justamente conseguir entender qual modo de falha se manifestou primeiro: se a degradação causada por uso incorreto ou o defeito de manufatura.

3.2 Confiabilidade

Falha é um fenômeno inevitável em todos os produtos e sistemas tecnológicos. Do ponto de vista da engenharia, se faz necessário entender os limites funcionais e físicos dos sistemas como parte do esforço para se compreender o que pode levar um sistema a não funcionar corretamente (ZIO, 2007).

Conforme indicado pela NBR-5462, confiabilidade é “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um determinado tempo”. (NBR-5462, 1994, p. 03).

Assim, só se tem a conceituação correta da confiabilidade de um item quando associa-se a probabilidade de falha com um período ou contagem de eventos (como os ciclos de uso de uma bateria). Baterias são componentes críticos e que podem causar a imobilização do veículo quando apresentam falha. A confiabilidade é uma característica de grande relevância no contexto de aplicação de veículos comerciais pesados, pois paradas não planejadas levam à redução de disponibilidade do transporte, perda de janelas de coleta e outros inconvenientes relacionados com a fidelidade de entrega. Em veículos comerciais pesados modernos, com complexa arquitetura eletrônica embarcada, panes elétricas são falhas com elevado potencial de imobilização. No caso das baterias chumbo-ácidas, cuja aplicação SLI é responsável pela alimentação do motor de partida que faz com que o motor diesel inicie seu ciclo de trabalho, falhas afetam diretamente a capacidade da bateria em atender sua função primária.

O tempo de falha é definido como o tempo em que o final da vida útil de um componente é atingido ou o tempo o estado do componente é tal que a sua função primária não é mais exequível com a requerida qualidade (VORONOV, 2017).

Avaliações de confiabilidade para vida de baterias são repletas de dificuldades. Dados de performance não estão prontamente disponíveis e são custosos para se ensaiar, pois uma grande quantidade de itens deveria ser ensaiada até a ocorrência de falha. Os ciclos de carga e descarga tomam muito tempo para ocorrer e utilizar fatores de aceleração para estes ensaios pode acabar levando a resultados incorretos. Como a durabilidade de uma bateria automotiva é dependente da temperatura de operação, taxa e profundidade de descarga e stress mecânico (vibração), é muito provável que alterar estes fatores para se acelerar a ocorrência de não-conformidades irá introduzir novos modos de falha que não são representativos para a aplicação do componente.

O método mais comum para avaliação da vida de uma bateria é a contagem de ciclos que o sistema suporta antes que determinada característica apresente uma alteração em determinado nível. Esta é a forma com que a norma “NBR 15940:2019 - Baterias chumbo-ácido para uso em veículos rodoviários automotores de quatro ou mais rodas - Especificação e métodos de ensaio” define o conceito de durabilidade, em seu item 8.11. Esta norma em específico avalia a perda de capacidade da bateria quando submetida a ciclagem, para mensurar se suporta diversas repetições de carga e descarga em um intervalo pré-determinado (GODINHO, 2017).

Um problema para predição da vida útil de baterias chumbo-ácidas é a grande quantidade de modos de falha existentes, cada qual com suas características e tempos de falha, o que requer uma avaliação específica para cada modo de falha. Para se conduzir esta avaliação pode-se utilizar o modelo de distribuição de vida de Weibull. Waloddi Weibull foi um engenheiro sueco que em 1939 sugeriu uma distribuição matemática que poderia representar uma grande variedade de falhas características simplesmente se alterando dois parâmetros facilmente determináveis. A distribuição de Weibull não se aplica para todo mecanismo de falha, mas é uma ferramenta útil para análise da maioria dos problemas de confiabilidade (ABERNETHY, 1994).

A distribuição cumulativa de falhas para falhas estatisticamente independentes em um determinado tipo de distribuição de Weibull é dada pela Equação 01 (ABERNETHY, 1994):

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

onde tem-se que:

F(t) é o percentual acumulado que irá falhar depois do tempo t;

η é a vida característica do componente (também chamado fator de escala);
 β é o parâmetro de forma que descreve a curva de distribuição de falha

Os parâmetros η e β são determinados graficamente a partir de dados coletados em testes sobre uma amostragem relativamente pequena. A expressão é um modelo matemático representando a forma da distribuição, sendo que não significa necessariamente uma relação de causa e efeito. A vida característica é definida como o tempo no qual o percentual de falha acumulado de uma população atinge 63,2%. A vida característica é alcançada ao se equiparar os parâmetros $t = \eta$ na Equação 01, assim quando $t = \eta$, a porcentagem de falha cumulativa é dada pela Equação 02, independentemente do valor de β . (ABERNETHY, 1994).

$$F(t) = 1 - e^{-1} = 63,2\% \quad (2)$$

Se mais de um modo de falha se apresentam dentro da mesma população, os fatores η e β apropriados para cada modo de falha devem ser aplicados separadamente para se obter o percentual de falha. Uma análise não pode ser conduzida com dois ou mais modos de falhas distintos atuando sobre a população, pois haveria uma sobreposição das características de cada grupo e isso geraria uma avaliação incorreta pelo modelo matemático.

A distribuição dos tempos de vida de cada item dentro da população total é dada pela derivada do tempo da distribuição de falha cumulativa (ABERNETHY, 1994). Assim tem-se na Equação 03

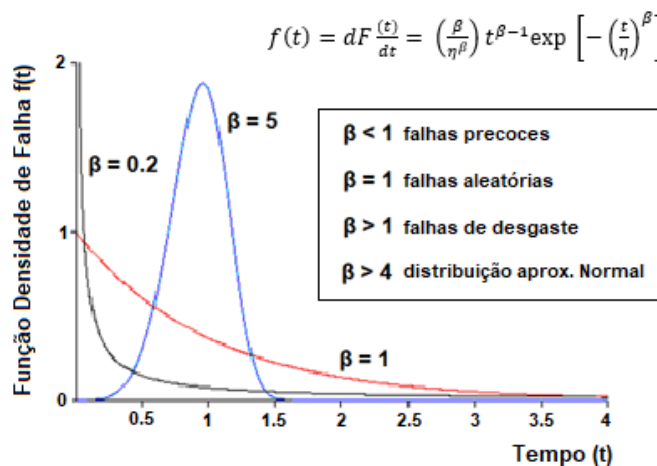
$$f(t) = dF \frac{(t)}{dt} = \left(\frac{\beta}{\eta^\beta} \right) t^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

Exemplos de distribuições com diferentes formas (β) são mostradas na Figura 01. As curvas de probabilidade de falhas são as linhas envoltórias de histogramas que representam a distribuição dos tempos de vida de cada componente dentro da população total.

A variação obtida pelos parâmetros η e β conseguem trazer informações importantes sobre as condições de confiabilidade do material que está sendo avaliado.

Alguns modelamentos mais complexos trazem ainda o parâmetro γ , conhecido como parâmetro de localização e que representa o tempo que se passou até que os efeitos da falha comecem a se manifestar (como por exemplo: tempo para que uma trinca comece a se manifestar antes da efetiva ruptura de uma estrutura).

FIGURA 01 – Exemplos de distribuições de Weibull com diferentes formas



Fonte: Adaptado de ABERNETHY (1994)

4. Resultados

Foram analisados 86 processos de garantia encaminhados ao fabricante das baterias, cujas avaliações indicaram que 26% das ocorrências foram classificadas como procedentes, atribuídas à responsabilidade do fabricante, enquanto 74% foram consideradas improcedentes, resultantes de falhas associadas ao uso ou às condições de operação. A relação completa dos modos de falha improcedentes encontra-se no Quadro 01.

Quadro 01 – Ocorrências de garantia improcedentes após análise

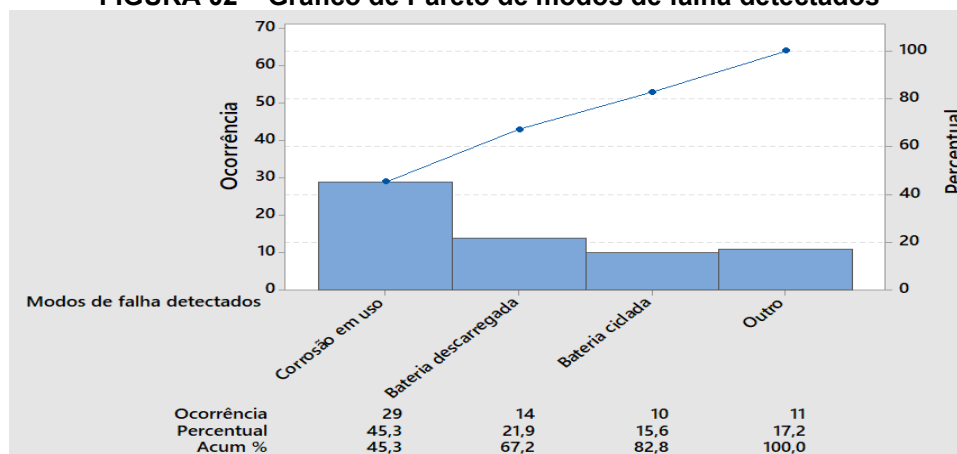
Modos de falha detectados	Decisão	Ocorrência	Recusado, %	Vida média, km
Corrosão em uso	Improcedente	29	45,3%	64.000
Bateria descarregada	Improcedente	14	21,8%	12.500
Bateria ciclada	Improcedente	10	15,6%	31.000
Sulfatação sem reparação	Improcedente	8	12,5%	34.500
Bateria queimada por sobrecarga	Improcedente	2	3,2%	61.000
Polo danificado pelo cliente	Improcedente	1	1,6%	50.000

Fonte: Elaborado pelo autor

As falhas procedentes são aquelas em que o fabricante foi responsabilizado. Na população avaliada, houve 22 casos, distribuídos em dois modos de falha: curto-circuito interno (21 ocorrências) e vazamento (1 ocorrência). O percentual de falhas procedentes em garantia envolvendo ocorrências de bateria representa 0,11% da população total de baterias aplicadas na frota em avaliação (20.370 baterias).

Para avaliação dos critérios de vida relacionados com falhas improcedentes foram selecionados os três modos de falha mais frequentes listados no Quadro 01. Estes modos de falha representam 82,8% do total de casos improcedentes e são identificados por meio do diagrama de Pareto apresentado na Figura 02. Os três modos com maior frequência indicados neste Pareto (corrosão em uso, bateria descarregada e bateria ciclada) foram avaliados, seguindo o princípio 80/20 de Pareto.

FIGURA 02 – Gráfico de Pareto de modos de falha detectados



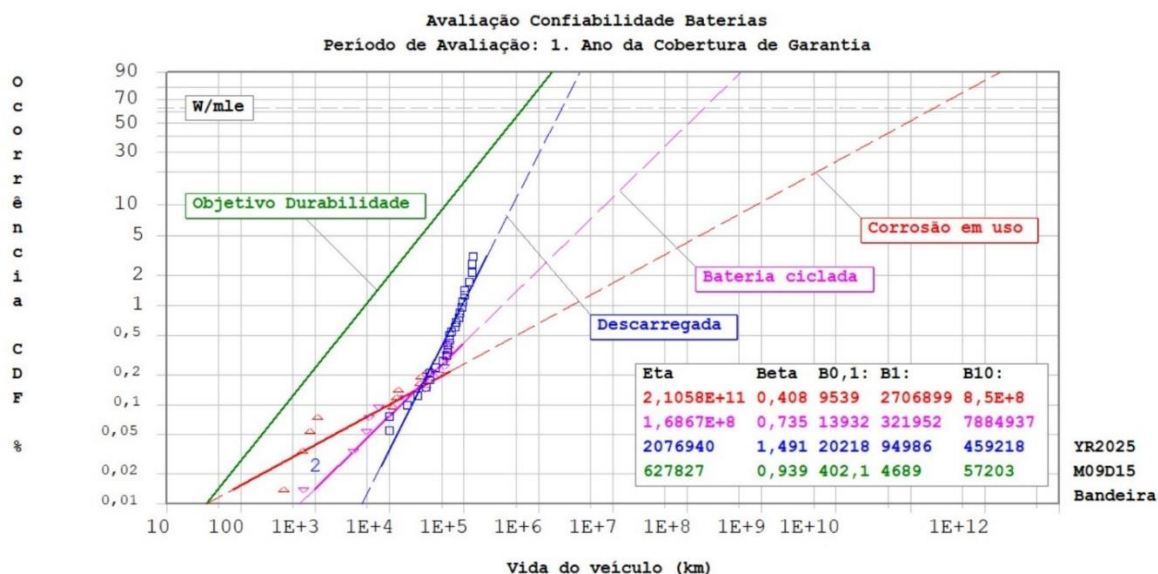
Fonte: Elaborado pelo autor

Para preservação de informações confidenciais da companhia foi aplicado um fator aos dados utilizados na análise de Weibull, o que não altera o comportamento observado no estudo. O gráfico gerado com os dados inseridos é apresentado na Figura 03.

O gráfico gerado mostra a vida acumulada do produto no eixo horizontal, criado em uma escala logarítmica, e a densidade acumulada de falha no eixo vertical (*CDF – Cumulative Density Failure*, ou densidade acumulada de falha). Cada modo de falha é representado por uma cor / figura geométrica, com a posição de cada figura representando o momento em que a falha ocorreu. A reta tracejada, construída da mesma cor que as figura geométricas, busca o melhor ajuste dentre estes pontos. É importante destacar que cada reta representa um único modo de falha, sendo esta uma condição para execução da avaliação. A linha

verde representa a expectativa de vida útil que se tem sobre a bateria, definida pelo fabricante e que considera as condições tecnológicas do componente para sua determinação.

FIGURA 03 – Distribuição de Weibull para falhas em baterias



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma análise inicial detecta que as linhas que representam falhas se posicionam à direita da linha verde, o que indica que as falhas ocorrem em momento localizado após a expectativa de vida. Como o eixo horizontal representa a vida do item em avaliação, quanto mais à direita o elemento se posiciona mais vida foi acumulada, ou seja, as falhas apresentadas pela bateria ainda atendem as condições esperadas do produto.

A caixa no canto inferior direito mostra os resultados desta avaliação, destacando os parâmetros η (Eta), β (Beta), e os parâmetros de vida B0,1, B1 e B10.

Os valores de η obtidos nas avaliações são extremamente altos, sendo um reflexo do alto número de suspensões (dados censurados, ou seja, veículos sem falha) e por isso não pode ser considerado como factível.

Os valores de β trazem informações sobre o mecanismo de falha. A avaliação das baterias classificadas como apenas "descarregadas" revelou um valor de β igual a 1,491, conforme estimado pela distribuição de Weibull. Esse resultado indica que a taxa de falha associada a esse modo específico não é constante ao longo do tempo, mas aumenta gradualmente com o uso, caracterizando um comportamento típico de desgaste progressivo. Embora o descarregamento não configure, em si, uma falha de fabricação, o valor de $\beta > 1$ sugere que sua ocorrência tende a se intensificar com o tempo de operação do veículo, possivelmente em decorrência de fatores como o acúmulo de condições desfavoráveis de uso, deficiências no sistema de carga ou práticas inadequadas por parte do usuário. Assim, é possível se inferir que este modo de falha apresenta comportamento não aleatório, sendo influenciado por variáveis operacionais e contextuais, o que reforça a importância de medidas corretivas como o aprimoramento do diagnóstico no atendimento técnico, o treinamento de motoristas e a implementação de estratégias de prevenção baseadas em monitoramento do estado de carga da bateria.

As análises de confiabilidade baseadas na distribuição de Weibull indicaram que os modos de falha classificados como "bateria ciclada" ($\beta = 0,408$) e "corrosão em uso" ($\beta = 0,735$) apresentam valores de β inferiores a 1. Esse resultado caracteriza uma taxa de falha

decrecente ao longo do tempo, típica de falhas precoces, concentradas nos estágios iniciais da vida útil do componente. No caso das baterias cicladas, o baixo valor de β sugere uso em condições severas de carga e descarga logo após a instalação, ou dimensionamento inadequado frente à demanda energética do veículo. Para o caso da corrosão em uso, o valor observado indica exposição prematura a ambientes operacionais agressivos ou práticas de uso que aceleram a degradação das placas positivas. Em ambos os casos infere-se que as falhas não decorrem de envelhecimento natural, mas sim de inadequações nas condições iniciais de uso.

Os valores B0,1, B1 e B10 representam os pontos de vida em que se espera que 0,1%, 1% e 10% da população avaliada tenha falhado, respectivamente. Esses indicadores são úteis para estimar o momento da vida em que certos percentuais de baterias deixam de atender à sua função, servindo como referências práticas para análise de confiabilidade em campo. Os valores avaliados para todos os modos de falha são superiores ao ponto de avaliação na linha de objetivo de durabilidade, representando o atingimento destes objetivos.

5. Conclusões

Este artigo apresentou uma avaliação das condições de falha em baterias chumbo ácidas, modelo de armazenamento de energia que domina o mercado de veículos comerciais pesados. As análises realizadas sobre os dados coletados permite as seguintes conclusões:

- 74% das baterias substituídas em garantia não apresentaram falhas de fabricação, sendo as causas associadas ao uso inadequado ou a condições operacionais adversas;
- entre os modos de falha não atribuídos ao fabricante, três se destacaram e somam 82,7% das ocorrências: corrosão em uso (45,3%), bateria descarregada (21,8%) e bateria ciclada (15,6%);
- a análise de confiabilidade por meio da distribuição de Weibull indicou que, mesmo entre os casos improcedentes, a durabilidade esperada das baterias foi atendida;
- a avaliação do parâmetro β revelou que falhas por bateria descarregada tendem a se intensificar com o tempo de uso, enquanto corrosão em uso e bateria ciclada se comportam como falhas precoces. Isso evidencia que os modos de falha decorrem de mecanismos distintos, relacionados tanto ao uso prolongado quanto a falhas na aplicação inicial;
- dada essa diversidade de mecanismos, a mitigação das falhas requer abordagens diferenciadas, que envolvem desde o treinamento técnico de profissionais responsáveis pelo diagnóstico até ações educativas voltadas aos motoristas quanto ao uso correto das baterias.

Este artigo atinge seu objetivo proposto de contribuir para o entendimento da análise de falhas em baterias ao estratificar as ocorrências e apresentar uma análise estatística dos dados coletados. Sugestões de trabalhos futuros que podem contribuir para o melhor entendimento das falhas com maior incidência dentre as avaliadas neste artigo:

- conduzir uma avaliação nas aplicações dos veículos que apresentam falhas de corrosão em uso e baterias cicladas, buscando compreender quais as condições (de uso ou ambientais) que propiciam a ocorrência destes modos de falha;
- uma verificação nas condições de diagnóstico inicial das falhas em baterias reportadas, explorando meios para facilitar a identificação de baterias sem falhas (descarregadas).

Referências

ABERNETHY, R. **The new Weibull handbook**. 4. ed. North Palm Beach: Robert Abernethy, 1994.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BAHADUR, A., *et al.* Electrochemical study of specially designed graphene-Fe₃O₄-polyaniline nanocomposite as a high-performance anode for lithium-ion battery. **Dalton Transactions**, v. 47, p. 15031, 2018

BENNETT, S. **Heavy duty truck systems**. 5. ed. Clifton Park: Delmar Learning, 2011.

BERNDT, D. **Maintenance-free batteries – A handbook of battery technology**. New York: John Wiley & Sons INC, 2011.

BUDIMAN, A., *et al.* Estimation of lead Battery degradation, - a model for the optimization of battery energy storage system using machine learning. **Eletrochem**, v. 6, n. 3, p. 33, 2025.

CONRADT, R.; *et al.* Comprehensive study of failure mechanisms of field aged automotive lead batteries. **Batteries**, v. 9, issue 553, 2023.

CULPIN, B.; RAND, A. Failure modes of lead/acid batteries. **Journal of Power Sources**, v. 36, p. 415-438, 1991.

GODINHO, M. **Desenvolvimento de programa para ensaio de proficiência em baterias Segundo a norma ISO/IEC 17043**. Curitiba, 102 p., 2017. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto Lactec.

JUNG, J. **Lead-acid battery technologies: fundamentals, materials and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

LINDEN, D.; REDDY, T. **Handbook of batteries**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2002.

MURARI, T.; *et al.* Early detection of failing lead-acid automotive batteries using the detrended cross-correlation analysis coefficient. **Applied System Innovations**, v. 8, issue 29, 2025.

NGUYEN, T. **Lead acid batteries in extreme conditions: accelerated charge, maintaining the charge with imposed low current, polarity inversions introducing non-conventional charge methods**. Montpellier, 175 p., 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Montpellier, França.

OLIVEIRA, J. **Avaliação e melhoria no rendimento elétrico de acumuladores chumbo-ácido para motocicletas**. Tubarão, 102 p., 2008. Monografia (Graduação) - Universidade do Sul de Santa Catarina.

PAVLOV, D. **Lead-acid batteries, science and technology**. Londres: Elsevier, 2011.

PAGANI, R.; KOVALESKI, J.; RESENDE, L. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, p. 2019-2135, set. 2015;

VORONOV, S. **Data-driven lead-acid battery lifetime prognostics**. Linköping, 157 p., 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Linköping, Suécia.

VORONOV, S.; KRYSANDER, M.; FRISK, E. Predictive maintenance of lead-acid batteries with sparse vehicle operational data. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 11, n. 1, 2020.

ZIO, E. **An introduction to the basics of reliability and risk analysis**. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.