RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

A massa das baterias como vetor de reconfiguração do chassi em veículos elétricos e seus efeitos sobre suspensão, freios e estrutura

Battery mass as a driver of chassis reconfiguration in electric vehicles and its effects on suspension, brakes and body structure

La masa de las baterías como vector de reconfiguración del chasis en vehículos eléctricos y sus efectos sobre la suspensión, los frenos y la estructura

André Gustavo Baiak
Engenheiro Mecânico pela Universidade Positivo. Técnico em Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR, atual UTFPR). MBA em Gerenciamento de Projetos pela Faculdade de Tecnologia SENAI Curitiba. Associado à Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA).

RESUMO
A eletrificação dos automóveis e dos veículos comerciais leves concentrou no sistema de armazenamento de energia uma parcela expressiva da massa total do veículo, com consequências que ultrapassam a questão da autonomia e alcançam o projeto do chassi como um todo. Este artigo examina, por meio de revisão narrativa da literatura técnica e científica complementada por análise analítica elementar, de que forma o acréscimo e a redistribuição de massa associados às baterias de tração afetam a suspensão, os pneus e as rodas, os sistemas de freio e a estrutura da carroceria de veículos elétricos a bateria. A revisão reúne obras de referência em dinâmica veicular e engenharia de chassi, estudos empíricos sobre consumo energético e emissões não exaustivas, pesquisas sobre segurança mecânica de baterias e marcos regulatórios recentes, como o Regulamento (UE) 2024/1257 e a Lei nº 14.902/2024. Os resultados indicam que a massa adicional desencadeia efeitos secundários em cascata, que exigem o redimensionamento de molas, amortecedores, rodas, discos e pinças, reduzem o espaço de instalação disponível e transformam o pacote de baterias em um elemento a ser protegido e, cada vez mais, integrado à estrutura. A frenagem regenerativa reduz a solicitação dos freios de atrito, mas não dispensa o dimensionamento para a condição mais severa e introduz novos problemas de corrosão e de integração eletrônica. Conclui-se que a redução de massa deve ser tratada como requisito sistêmico de projeto, com repercussões diretas sobre eficiência energética, segurança viária e desempenho ambiental.
Palavras-chave: Veículos elétricos. Massa veicular. Suspensão. Frenagem regenerativa. Estrutura veicular.

ABSTRACT
The electrification of passenger cars and light commercial vehicles has concentrated a significant share of total vehicle mass in the energy storage system, with consequences that go beyond driving range and reach the design of the chassis as a whole. This paper examines, through a narrative review of the technical and scientific literature complemented by an elementary analytical assessment, how the additional and redistributed mass associated with traction batteries affects the suspension, tyres and wheels, braking systems and body structure of battery electric vehicles. The review brings together reference works on vehicle dynamics and chassis engineering, empirical studies on energy consumption and non-exhaust emissions, research on the mechanical safety of batteries and recent regulatory frameworks, such as Regulation (EU) 2024/1257 and Brazilian Law No. 14,902/2024. The results indicate that the additional mass triggers cascading secondary effects that require the resizing of springs, dampers, wheels, discs and calipers, reduce the available installation space and turn the battery pack into an element that must be protected and, increasingly, integrated into the structure. Regenerative braking reduces the demand on friction brakes, but it does not remove the need to size them for the most severe condition, and it introduces new issues of corrosion and electronic integration. It is concluded that mass reduction should be treated as a systemic design requirement,

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

with direct repercussions on energy efficiency, road safety and environmental performance.
Keywords: Electric vehicles. Vehicle mass. Suspension. Regenerative braking. Vehicle structure.

1 INTRODUÇÃO

A substituição progressiva do motor de combustão interna pelo trem de força elétrico alterou um dos parâmetros mais elementares do projeto automotivo, que é a massa do veículo. Em um automóvel elétrico a bateria, o pacote de baterias de tração costuma ser o componente individual mais pesado do conjunto, e sua massa não se limita às células eletroquímicas. König et al. (2021) mostram que a densidade energética gravimétrica medida no nível do pacote é sensivelmente inferior à das células, porque sistemas de arrefecimento, cabeamento, carcaças e elementos de fixação acrescentam massa e volume sem armazenar energia. Weiss, Cloos e Helmers (2020), ao analisarem 428 veículos elétricos de diferentes categorias, confirmaram que capacidade de bateria e massa veicular estão fortemente correlacionadas e que dobrar a massa eleva o consumo certificado de energia em cerca de 60%, enquanto dobrar a potência nominal do motor o eleva em apenas cerca de 5%.

Para a engenharia de chassi, essa massa adicional não é um dado neutro. Suspensão, direção, freios, rodas, pneus, eixos e subchassis são dimensionados a partir das cargas que o veículo impõe ao solo e das acelerações a que será submetido, de modo que qualquer acréscimo relevante de massa se propaga por praticamente todos os subsistemas. Obras de referência como as de Reimpell, Stoll e Betzler (2001) e de Heißing e Ersoy (2011) descrevem o chassi como um sistema fortemente acoplado, no qual decisões tomadas para um componente repercutem sobre a cinemática, a elastocinemática, o conforto e a segurança do conjunto. Nicoletti et al. (2020) demonstraram, em modelagem paramétrica aplicada a veículos elétricos, que variações de massa nas fases iniciais do desenvolvimento provocam alterações secundárias de massa e volume em rodas, discos e pneus, chegando a comprometer o espaço de instalação disponível no eixo dianteiro.

Diante desse quadro, o presente artigo tem por objetivo analisar de que maneira a massa e a posição das baterias de tração condicionam o projeto da suspensão, dos pneus e rodas, dos sistemas de freio e da estrutura da carroceria em veículos elétricos a bateria, bem como discutir as implicações dessa condição para a segurança viária, as emissões não exaustivas e a regulação. O texto está organizado em seis eixos temáticos, precedidos pela descrição do método e seguidos de considerações finais. Parte-se da premissa, sustentada pela literatura revisada, de que a massa deixou de ser apenas um resultado do projeto e passou a funcionar como variável estruturante das decisões de engenharia, o que exige abordagens integradas desde a concepção do produto.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

2 METODOLOGIA

O estudo adota a abordagem de revisão narrativa da literatura, de natureza qualitativa e caráter exploratório e descritivo, adequada a temas em que convergem disciplinas distintas, como dinâmica veicular, engenharia de materiais, segurança de baterias, ciência ambiental e regulação. Diferentemente de uma revisão sistemática, que exige protocolo fechado de busca e critérios estatísticos de agregação, a revisão narrativa permite articular fontes de natureza diversa, como livros de referência, artigos revisados por pares, relatórios técnicos de agências governamentais e textos normativos, em torno de uma questão de engenharia definida. Essa escolha é coerente com o objetivo do trabalho, que não é estimar um efeito médio, mas compreender os mecanismos pelos quais a massa da bateria se converte em requisitos de projeto do chassi.

A seleção das fontes foi realizada em bases e repositórios de reconhecida idoneidade, entre eles ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, SAE Mobilus, PubMed Central e os portais oficiais de legislação da União Europeia e do Brasil. Foram utilizados descritores em português e em inglês relacionados à massa de veículos elétricos, densidade energética de baterias, suspensão e dinâmica vertical, cargas em pneus, frenagem regenerativa, desgaste de freios, emissões não exaustivas, impacto e proteção de baterias e baterias estruturais. Os critérios de inclusão privilegiaram trabalhos publicados em periódicos indexados, obras clássicas amplamente citadas na engenharia automotiva e documentos oficiais, com verificação individual de autoria, ano, volume, paginação e identificador digital de cada referência. Foram excluídos materiais de divulgação comercial e textos sem autoria ou procedência rastreável.

De forma complementar, realizou-se uma análise analítica elementar baseada em relações físicas consolidadas, como a expressão da energia cinética, a frequência natural de um sistema massa e mola e a transferência de carga lateral, com o propósito de tornar explícita a ordem de grandeza dos efeitos discutidos. Os valores apresentados nessa análise são ilustrativos e não representam veículos específicos, servindo apenas para demonstrar a proporcionalidade entre massa e solicitações mecânicas. Reconhece-se como limitação do método a ausência de dados experimentais próprios e a dependência de resultados obtidos em contextos de ensaio e de frota distintos, razão pela qual as conclusões são formuladas em termos de tendências e mecanismos, e não de valores universais.

3 A MASSA DA BATERIA E A NOVA ARQUITETURA DO VEÍCULO

A primeira consequência da eletrificação sobre o chassi é de natureza arquitetônica. Em veículos desenvolvidos sobre plataformas dedicadas, o pacote de baterias ocupa normalmente o assoalho, entre

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

os eixos, formando uma grande massa concentrada em posição baixa. König et al. (2021) observam que a diferença entre a densidade energética das células e a do pacote decorre de elementos periféricos indispensáveis, como módulos, sistema térmico, conectores e carcaça. Os autores registram ainda que a integração direta das células ao pacote, conhecida como cell-to-pack, foi anunciada com o propósito de eliminar módulos intermediários e reduzir a massa da bateria em cerca de 10%, embora ainda não houvesse veículo de série com essa solução quando o estudo foi publicado. Com base em estimativas de outros pesquisadores, o mesmo trabalho indica limites práticos para a densidade gravimétrica das células de íons de lítio na faixa de 350 a 370 Wh/kg, o que sugere que a massa associada ao armazenamento de energia continuará relevante no horizonte próximo.

A posição do pacote tem efeitos que, sob certos aspectos, são favoráveis. Arora, Shen e Kapoor (2016), ao revisarem técnicas de projeto mecânico e de posicionamento estratégico de baterias, discutem a escolha do local de instalação do pacote como parte da estratégia de proteção do conjunto, tomando como exemplo um automóvel elétrico produzido em série. A instalação sob o assoalho, adotada em grande parte das plataformas dedicadas, tem ainda o efeito de rebaixar o centro de gravidade, cuja importância pode ser compreendida pelo fator de estabilidade estática, definido pela razão entre a bitola e o dobro da altura do centro de gravidade. Walz (2005), em relatório técnico da National Highway Traffic Safety Administration, utiliza esse indicador para avaliar a propensão ao capotamento e mostra que valores mais altos correspondem a veículos menos suscetíveis a esse tipo de acidente. Uma bateria baixa e larga tende, portanto, a elevar esse fator, ainda que acrescente massa ao conjunto.

A distribuição da massa também altera os momentos de inércia e a transferência de carga entre as rodas. Gillespie (1992) mostra que a transferência lateral de carga em curva é proporcional ao produto da massa pela aceleração lateral e pela altura do centro de gravidade, e inversamente proporcional à bitola. Um centro de gravidade mais baixo atenua essa transferência e favorece o aproveitamento da aderência dos pneus, mas a massa total maior eleva as forças absolutas que pneus, buchas, braços e mancais precisam suportar. A concentração da bateria entre os eixos, próxima ao centro do veículo, tende ainda a moderar o momento de inércia em guinada em comparação com massas distribuídas nas extremidades, o que influencia a resposta direcional. O resultado é um veículo de comportamento potencialmente mais estável, porém submetido a solicitações mecânicas mais elevadas em quase todos os componentes.

O efeito mais sutil, e talvez o mais desafiador para as equipes de desenvolvimento, é o encadeamento de massas secundárias. Nicoletti et al. (2020) modelaram parametricamente os componentes das rodas de veículos elétricos e concluíram que uma variação primária de cerca de 6% da massa em ordem de marcha pode reduzir em até 12% o espaço de instalação disponível no eixo dianteiro, conforme a

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

estratégia de projeto adotada. Os autores estimam que, para essa mesma variação, a massa das rodas aumenta de 0,5 a 1,5 kg por roda nos casos em que não há mudança de aro, mas que uma estratégia inadequada pode elevar esse acréscimo total para cerca de 20 kg. Em um dos casos estudados, um aumento de apenas 0,7% na massa do veículo tornou o disco de freio incompatível com o menor aro de 19 polegadas oferecido, evidenciando a sensibilidade do pacote de rodas e freios às variações de massa.

Esse encadeamento tem reflexo direto sobre o desempenho energético e, consequentemente, sobre o próprio tamanho da bateria. Weiss, Cloos e Helmers (2020) estimaram que, em automóveis elétricos, cada 100 kg adicionais elevam o consumo em aproximadamente 0,6 kWh a cada 100 km. Para manter a autonomia, o projetista tende a aumentar a capacidade da bateria, o que adiciona massa e realimenta o ciclo. Kim e Wallington (2013), em revisão e harmonização de estudos de ciclo de vida, demonstraram que a redução de massa produz benefícios energéticos e de emissões de gases de efeito estufa ao longo da vida do veículo, e Candela et al. (2024) sistematizaram os materiais e métodos de redução de massa empregados pela indústria, como aços de alta resistência, ligas de alumínio e compósitos. Esses estudos convergem para a conclusão de que, no veículo elétrico, a gestão da massa deixou de ser uma otimização final e passou a ser uma condição de partida do projeto.

4 SUSPENSÃO E DINÂMICA VERTICAL SOB CARGAS MAIS ELEVADAS

A suspensão é o primeiro subsistema a sentir o acréscimo de massa, pois sustenta a carga estática do veículo e controla seus movimentos sobre as irregularidades do pavimento. Gillespie (1992) descreve o comportamento vertical da massa suspensa por meio de modelos de um quarto de veículo, nos quais a frequência natural é proporcional à raiz quadrada da razão entre a rigidez equivalente da suspensão e a massa suportada. Como o conforto percebido pelos ocupantes está associado a faixas relativamente estreitas de frequência natural da carroceria, um aumento de massa exige aumento proporcional da rigidez das molas para preservar essa frequência. Em termos práticos, um veículo elétrico 25% mais pesado que seu equivalente a combustão demanda molas cerca de 25% mais rígidas para manter o mesmo comportamento de rodagem, o que aumenta as tensões no material, as cargas nos apoios e as dimensões dos componentes.

O mesmo raciocínio se aplica aos amortecedores. A razão de amortecimento, parâmetro que define a rapidez com que as oscilações da carroceria são dissipadas, depende da relação entre o coeficiente de amortecimento e a raiz do produto da rigidez pela massa. Reimpell, Stoll e Betzler (2001) tratam o ajuste dos amortecedores como um compromisso entre conforto e controle da roda, que precisa ser refeito sempre que as massas e as rigidezes do sistema se alteram. Com mais massa e molas mais

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

rígidas, os amortecedores precisam gerar forças maiores para manter a mesma razão de amortecimento, dissipando mais energia na forma de calor. Isso afeta o dimensionamento das válvulas internas, do diâmetro do tubo e da haste, bem como a durabilidade das vedações e das buchas de fixação, que passam a operar sob carregamentos médios mais altos ao longo de toda a vida útil do veículo.

A variação de carga entre as condições vazia e carregada acrescenta outra dificuldade. Em automóveis, a diferença entre o veículo apenas com o motorista e o veículo com passageiros e bagagem já exige soluções de compromisso. Em veículos comerciais leves elétricos, nos quais a massa da bateria se soma à carga útil, essa amplitude se torna crítica, porque a suspensão precisa garantir altura, estabilidade e conforto em condições muito diferentes. Heißing e Ersoy (2011) discutem as suspensões pneumáticas e os sistemas de nivelamento como meios de manter a altura do veículo e a frequência natural relativamente constantes sob carga variável, embora com aumento de custo e complexidade. A escolha entre molas helicoidais progressivas, feixes de molas, molas pneumáticas ou combinações dessas soluções passa a depender da massa da bateria tanto quanto do perfil de uso do veículo.

A massa não suspensa merece atenção particular. Ela compreende rodas, pneus, cubos, discos, pinças e parte dos braços de suspensão, elementos que se movimentam junto com a roda e não são isolados pelas molas. Gillespie (1992) mostra que a razão entre massa suspensa e massa não suspensa influencia o contato do pneu com o solo e a ressonância da roda, situada em frequências muito superiores às da carroceria. O aumento de massa leva frequentemente a discos maiores, pinças mais robustas e rodas de maior diâmetro, como apontado por Nicoletti et al. (2020), o que eleva justamente a massa não suspensa e pode prejudicar a aderência em pavimentos irregulares. Propostas de motores instalados no interior das rodas agravam essa questão, e o aumento da massa não suspensa costuma ser apontado entre os fatores que levam a maior parte dos veículos elétricos produzidos em série a manter os motores fixados à carroceria ou ao subchassi, com transmissão do torque por semieixos.

As suspensões semiativas e ativas aparecem como resposta tecnológica a esse conjunto de compromissos. Savaresi et al. (2010) apresentam métodos de controle para amortecedores de coeficiente variável que permitem ajustar continuamente o amortecimento à condição de rodagem, reduzindo o conflito entre conforto e controle da roda. A grande disponibilidade de energia elétrica a bordo dos veículos elétricos favorece, em princípio, o uso de atuadores, mas o consumo de energia desses sistemas precisa ser contabilizado na autonomia. Paralelamente, a ausência do ruído do motor de combustão torna mais perceptíveis os ruídos e vibrações transmitidos pela suspensão, o que confere às buchas e aos coxins um papel ainda mais importante no isolamento acústico. A suspensão do veículo elétrico precisa, assim, sustentar mais massa, controlar maiores amplitudes de carga e

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

transmitir menos ruído, três requisitos que nem sempre apontam na mesma direção.

5 PNEUS, RODAS E COMPORTAMENTO DINÂMICO LATERAL

Os pneus são o único elemento de contato entre o veículo e o solo e, por isso, traduzem diretamente o efeito da massa sobre o comportamento dinâmico. Pacejka (2012) demonstra que a força lateral que um pneu é capaz de gerar não cresce linearmente com a carga vertical, fenômeno conhecido como sensibilidade à carga. À medida que a carga aumenta, o coeficiente de atrito efetivo diminui, de modo que um veículo mais pesado precisa de pneus com maior área de contato, maior rigidez estrutural ou maior pressão de inflação para alcançar níveis equivalentes de aderência lateral. Essa característica tem implicação direta no projeto de veículos elétricos, nos quais o ganho proporcionado pelo centro de gravidade mais baixo pode ser parcialmente neutralizado pela queda do coeficiente de atrito efetivo associada às cargas verticais mais altas.

A capacidade de carga do pneu é outro limite a considerar. Pneus são especificados por índices de carga associados a uma pressão de referência, e veículos mais pesados exigem índices mais altos, construções reforçadas ou dimensões maiores. O aumento do diâmetro do aro, por sua vez, é muitas vezes imposto pela necessidade de acomodar discos de freio maiores, como evidenciado por Nicoletti et al. (2020) no caso em que um pequeno acréscimo de massa tornou o disco incompatível com o menor aro disponível. Rodas maiores e pneus mais largos elevam a massa não suspensa, o momento de inércia de rotação e, frequentemente, a resistência aerodinâmica e o ruído de rodagem. O projetista precisa equilibrar a capacidade de carga e a aderência com a resistência ao rolamento, que afeta diretamente o consumo de energia e a autonomia do veículo.

No comportamento direcional, a distribuição de massa entre os eixos define em grande parte a tendência subesterçante ou sobreesterçante do veículo. Gillespie (1992) expressa o gradiente de esterçamento como função das cargas em cada eixo e da rigidez lateral dos respectivos pneus. Como a bateria localizada entre os eixos tende a aproximar a distribuição de massa de uma condição equilibrada, o veículo elétrico de plataforma dedicada oferece ao engenheiro de chassi uma base favorável para a calibração do equilíbrio dinâmico. Ainda assim, o acréscimo de massa total aumenta as forças que os pneus precisam desenvolver em manobras de emergência, como mudanças bruscas de faixa, e exige maior atenção à rigidez das buchas, à geometria de convergência e cambagem e à calibração dos sistemas eletrônicos de controle de estabilidade.

O desgaste dos pneus é uma consequência direta da combinação entre maior massa e torque elevado disponível desde as baixas rotações. Beddows e Harrison (2021) analisaram a dependência dos fatores de emissão de partículas não exaustivas em relação à massa do veículo e mostraram que as emissões

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

provenientes do desgaste de pneus, do desgaste do pavimento e da ressuspensão de poeira aumentam com o peso. Timmers e Achten (2016) chegaram a resultado convergente ao concluir que veículos elétricos continuam a emitir quantidades relevantes de material particulado de origem não exaustiva, em parte porque são mais pesados que seus equivalentes a combustão. Do ponto de vista da engenharia de chassi, esses resultados reforçam a necessidade de compostos de borracha e estruturas de pneus específicos, capazes de suportar maiores cargas e torques sem degradação acelerada da banda de rodagem.

Rodas e sistema de direção completam esse quadro. As rodas precisam suportar cargas radiais e laterais mais elevadas, o que exige maior resistência mecânica e, muitas vezes, maior massa, em contradição com o objetivo de reduzir a massa não suspensa. No sistema de direção, cargas maiores no eixo dianteiro elevam as forças na cremalheira e o torque necessário para esterçar o veículo, especialmente em manobras de estacionamento. Heißing e Ersoy (2011) descrevem a direção com assistência elétrica como solução que permite modular a assistência conforme a velocidade e a carga, mas seu motor, sua eletrônica e seus mancais precisam ser dimensionados para os esforços mais altos. Em síntese, pneus, rodas e direção absorvem os efeitos da massa de forma interdependente, e qualquer otimização isolada tende a transferir o problema para outro componente do sistema.

6 FREIOS DE ATRITO E FRENAGEM REGENERATIVA

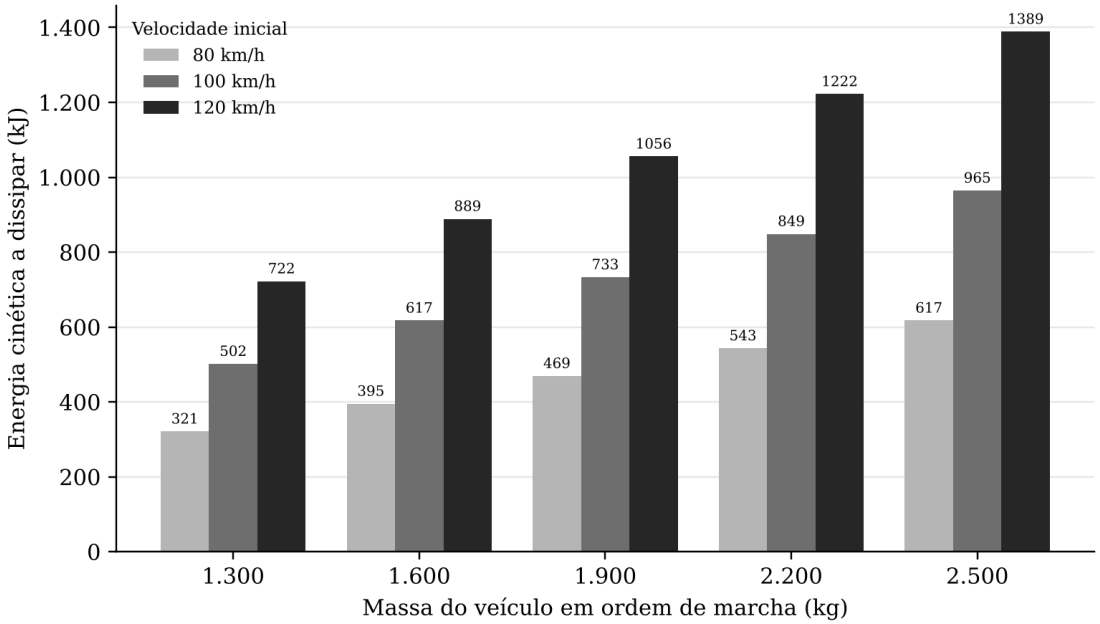
O sistema de freios é aquele em que a relação entre massa e solicitação aparece de forma mais direta. Limpert (2011) mostra que a energia a ser dissipada em uma frenagem corresponde à energia cinética do veículo, proporcional à massa e ao quadrado da velocidade, e que essa energia é convertida em calor nos discos, tambores e pastilhas. Em uma desaceleração de emergência, praticamente todo esse calor precisa ser absorvido pela massa térmica dos discos em poucos segundos. A Figura 1 ilustra a ordem de grandeza do problema. A 100 km/h, um veículo de 1.600 kg acumula cerca de 617 kJ de energia cinética, enquanto um veículo de 2.200 kg acumula cerca de 849 kJ, uma diferença de aproximadamente 38% que precisa ser dissipada pelos freios. Em frenagens repetidas, como em descidas longas, essa diferença se acumula e eleva o risco de perda de eficiência por superaquecimento, fenômeno conhecido como fading.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

Figura 1 – Energia cinética a ser dissipada pelo sistema de freios em função da massa do veículo e da velocidade inicial



Fonte: elaborada pelo autor (2026), com base na relação $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ apresentada por Limpert (2011).

A distribuição da força de frenagem entre os eixos também depende da massa e de sua posição. Limpert (2011) demonstra que a distribuição ideal é função da altura do centro de gravidade, da distância entre eixos e da distribuição estática de carga, pois a desaceleração transfere carga do eixo traseiro para o dianteiro. Em veículos com bateria no assoalho, o centro de gravidade mais baixo reduz essa transferência dinâmica e permite que o eixo traseiro contribua mais para a frenagem, o que favorece o aproveitamento da aderência disponível. Ao mesmo tempo, a massa total maior impõe discos de maior diâmetro e espessura, pinças com mais pistões ou pistões de maior área e fluidos com maior estabilidade térmica. Como mostrado anteriormente, essas escolhas têm efeitos sobre o diâmetro das rodas, a massa não suspensa e o espaço de instalação no eixo dianteiro.

A frenagem regenerativa modifica profundamente essa equação, pois permite que parte da energia cinética seja recuperada pelo motor elétrico operando como gerador. Gao e Ehsani (2001) propuseram arquiteturas de frenagem eletrônica que integram a regeneração, o controle automático da força de frenagem e o sistema antitravamento, tratando a coordenação entre freio elétrico e freio de atrito como parte do próprio projeto do sistema de frenagem. Lv et al. (2015) analisaram o fluxo de energia de um veículo elétrico com regeneração, propuseram dois parâmetros para avaliar a contribuição da frenagem regenerativa para a eficiência energética e os aplicaram em ensaios em dinamômetro de chassi com ciclos de condução típicos e três estratégias de controle distintas. Ehsani et al. (2018)

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

ressalta que a capacidade regenerativa é limitada pela potência do motor, pelo estado de carga e pela temperatura da bateria e pela redução da eficiência em baixas velocidades.

Por essas limitações, os freios de atrito continuam a ser dimensionados para a condição mais severa, em que a regeneração pode estar reduzida ou indisponível, como em uma parada de emergência com bateria totalmente carregada ou em baixas temperaturas. Surge, então, um paradoxo de projeto, pois o sistema precisa ser robusto o bastante para o pior caso, mas é pouco utilizado no uso cotidiano. Antanaitis (2010) observou que havia pouca pesquisa publicada sobre o que a redução drástica do uso dos freios de atrito significa para os próprios freios e apresentou análises e ensaios sobre corrosão, desgaste fora de frenagem e níveis de atrito em veículos com regeneração, propondo que o equilíbrio de projeto desses sistemas seja diferente daquele adotado em veículos convencionais. Essa constatação desloca o foco do projeto da capacidade térmica, tradicionalmente dominante, para a preservação das superfícies de atrito ao longo do tempo, o que envolve a escolha de materiais, a proteção contra corrosão e a lógica de acionamento dos freios de atrito pelo sistema de controle.

A dimensão ambiental dos freios reforça a importância da regeneração. Grigoratos e Martini (2015), em revisão sobre emissões de partículas por desgaste de freios, indicam que essa fonte pode responder por até 55% da massa das emissões não exaustivas de PM10 em ambientes urbanos e por cerca de 11% a 21% das emissões totais de PM10 relacionadas ao tráfego. Beddows e Harrison (2021) concluíram que o saldo de emissões de partículas dos veículos elétricos em relação aos convencionais depende criticamente da extensão do uso da frenagem regenerativa. Essa evidência foi incorporada à regulação europeia, pois o Regulamento (UE) 2024/1257 estabelece, para automóveis e furgões, limite de emissão de partículas de freios de 3 mg/km para veículos puramente elétricos e de 7 mg/km para a maior parte dos demais (UNIÃO EUROPEIA, 2024). O freio do veículo elétrico deixa, assim, de ser apenas um sistema de segurança e passa a ser também um objeto de controle ambiental.

7 ESTRUTURA DA CARROCERIA E PROTEÇÃO DO SISTEMA DE BATERIAS

A presença de uma grande massa sob o assoalho transforma a relação entre carroceria e sistema de armazenamento de energia. O pacote de baterias precisa ser fixado de modo a suportar vibrações de rodagem, acelerações de frenagem e de curva e cargas de impacto, sem que as células sofram deformações capazes de provocar curto-circuito interno. Arora, Shen e Kapoor (2016) revisaram mais de 75 fontes, entre elas dezenas de patentes, sobre características mecânicas de proteção de pacotes de baterias de íons de lítio contra fuga térmica, vibração e impacto, e concluíram que características mecânicas relativamente simples podem reduzir o risco de falha. Os autores identificam materiais adequados para os principais componentes do pacote e, a partir da comparação entre projetos

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

existentes, delineiam requisitos básicos para um sistema de acondicionamento robusto e confiável. Para o chassi, isso significa que os pontos de fixação, os suportes e a própria carcaça do pacote passam a integrar o caminho de cargas do veículo.

O impacto contra o solo representa uma solicitação específica da arquitetura com bateria no assoalho. Xia et al. (2014) desenvolveram uma metodologia baseada em um modelo global de elementos finitos de um pacote hipotético, complementado por modelos detalhados de células, para analisar impactos de objetos contra a parte inferior do veículo. Os resultados previram a perfuração da placa de proteção, a propagação de trincas e a deformação local das células, cuja falha os autores associam ao risco de curto-circuito e de fuga térmica. Um estudo paramétrico permitiu extrair regras gerais para o projeto das estruturas de proteção do pacote. Para a engenharia de chassi, esse tipo de solicitação impõe a consideração conjunta da altura livre do solo, da rigidez da suspensão e da proteção inferior, uma vez que o curso da suspensão e a altura de rodagem influenciam a probabilidade de contato.

Nas colisões, o pacote de baterias exige que a estrutura preserve um volume protegido em torno das células, sobretudo em impactos laterais contra postes, nos quais a zona de deformação disponível é pequena. Zhu, Wierzbicki e Li (2018) revisaram os modelos mecânicos orientados à segurança de baterias comerciais de íons de lítio, evidenciando a importância de representar adequadamente o comportamento mecânico dos componentes da célula para prever o início do curto-circuito sob carregamentos de impacto. Essa necessidade se traduz, na carroceria, em soleiras reforçadas, travessas sob o assoalho, perfis extrudados de alumínio e estruturas de absorção de energia projetadas para desviar as cargas do pacote. A massa dessas proteções se soma à massa da bateria, o que reforça o ciclo de crescimento de massa discutido na seção 3.

A tendência mais recente é tratar o pacote não apenas como carga a ser protegida, mas como elemento que contribui para a rigidez da carroceria. Nas soluções cell-to-pack, mencionadas por König et al. (2021), a eliminação de módulos intermediários aumenta a fração de massa ativa do pacote, e nas soluções em que o pacote é integrado ao assoalho, sua carcaça passa a trabalhar como parte da estrutura, elevando a rigidez torcional do conjunto. Essa integração pode reduzir massa e componentes redundantes, mas desloca para a estrutura requisitos de estanqueidade, gestão térmica e isolamento elétrico, além de dificultar a reparação e a substituição de células. Heißing e Ersoy (2011) lembram que a rigidez da carroceria é condição para que a cinemática da suspensão opere conforme o projeto, o que torna a integração estrutural da bateria uma decisão que envolve diretamente a engenharia de chassi.

No horizonte de pesquisa, as baterias estruturais propõem que o próprio material armazene energia e suporte cargas mecânicas. Asp et al. (2021) apresentaram uma bateria estrutural baseada em fibras de carbono com densidade energética de 24 Wh/kg, módulo de elasticidade de 25 GPa e resistência à

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

tração superior a 300 MPa. Embora a densidade energética ainda seja muito inferior à das células convencionais, o conceito indica uma direção em que a distinção entre massa estrutural e massa de armazenamento deixa de existir. Paralelamente, Candela et al. (2024) reúnem os principais materiais e métodos de redução de massa adotados pela indústria, como aços avançados de alta resistência, ligas de alumínio e compósitos, que ampliam as alternativas para compensar parte da massa acrescentada pela bateria. Essas frentes sugerem que a resposta ao problema da massa não virá de um único componente, mas da revisão integrada de estrutura, bateria e chassi.

8 IMPLICAÇÕES PARA A SEGURANÇA VIÁRIA, O AMBIENTE E A REGULAÇÃO

O aumento da massa dos veículos tem implicações que extrapolam o próprio veículo e atingem os demais usuários da via. Anderson e Auffhammer (2014), em estudo econométrico publicado na The Review of Economic Studies, estimaram que, mantida constante a massa do próprio veículo, ser atingido por um veículo cerca de 1.000 libras (aproximadamente 454 kg) mais pesado eleva o risco de morte em 40% a 50%, caracterizando uma externalidade negativa que não é considerada pelo comprador no momento da compra. Shaffer, Auffhammer e Samaras (2021), em artigo publicado na revista Nature, aplicaram esse raciocínio à eletrificação e defenderam que os veículos elétricos sejam mais leves para maximizar seus benefícios climáticos e de segurança, sugerindo a tributação de veículos pesados e a redução do tamanho das baterias. A massa passa a ser, portanto, uma questão de segurança coletiva e não apenas de desempenho individual.

No campo ambiental, a eletrificação elimina as emissões de escapamento no ponto de uso, mas não elimina as emissões não exaustivas. Timmers e Achten (2016) argumentaram que a maior massa dos veículos elétricos pode aumentar as emissões associadas ao desgaste de pneus, ao desgaste do pavimento e à ressuspensão de poeira, compensando parte da redução proporcionada pela frenagem regenerativa. Beddows e Harrison (2021), embora também tenham verificado que as emissões não exaustivas crescem com a massa, chegaram a uma conclusão mais matizada quanto ao saldo final, segundo a qual as mudanças nas emissões locais totais de partículas seriam modestas para um automóvel que atenda às normas de emissão vigentes, mas destacaram que o resultado depende fortemente do grau de uso da regeneração. A convergência entre esses estudos está no reconhecimento de que a massa é a variável que conecta o projeto do chassi à qualidade do ar nas cidades.

A regulação já começa a refletir essa conexão. O Regulamento (UE) 2024/1257, conhecido como Euro 7, incorporou pela primeira vez limites para emissões de partículas de freios e requisitos relativos à abrasão de pneus, além de exigências de durabilidade das baterias de tração, que, no caso dos automóveis, devem conservar 80% da capacidade inicial até cinco anos ou 100.000 km e 72% até

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

oito anos ou 160.000 km (UNIÃO EUROPEIA, 2024). Para a engenharia de chassi, isso significa que freios e pneus passam a ser homologados também por seu desempenho ambiental, o que influencia a escolha de materiais de atrito, revestimentos de discos e compostos de borracha. A diferenciação dos limites de freios entre veículos puramente elétricos e os demais reconhece o papel da regeneração, mas também cria um incentivo para estratégias de controle que maximizem a recuperação de energia, reforçando a integração entre o sistema de freios, o trem de força e o gerenciamento da bateria.

No Brasil, a Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024, instituiu o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover), voltado à descarbonização e à competitividade da indústria de mobilidade e ao estímulo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico no país (BRASIL, 2024). A lei estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos novos relativos à eficiência energética, reciclabilidade, rotulagem e desempenho estrutural e tecnologias assistivas à direção, e prevê alíquotas de IPI diferenciadas conforme atributos como eficiência energética e desempenho estrutural. Como a massa influencia diretamente o consumo de energia e o comportamento estrutural, ela adquire também relevância econômica para fabricantes e fornecedores instalados no país. Somam-se a isso as condições específicas do pavimento e do uso em boa parte das cidades e rodovias brasileiras, que intensificam as solicitações sobre suspensão, pneus e proteção inferior das baterias. A adaptação de plataformas elétricas desenvolvidas em outros mercados exige, por isso, validação local de durabilidade e de comportamento dinâmico, tarefa que recai diretamente sobre as equipes de engenharia de chassi.

Esses elementos indicam que o problema da massa nos veículos elétricos é simultaneamente técnico, ambiental, regulatório e social. A literatura revisada sugere que a resposta mais consistente é a incorporação da massa como requisito sistêmico desde as fases iniciais do desenvolvimento, com modelos paramétricos capazes de prever efeitos secundários, como os propostos por Nicoletti et al. (2020), e com a avaliação conjunta de bateria, estrutura e chassi. Ehsani et al. (2018) reforçam que o projeto de veículos elétricos exige abordagem integrada entre trem de força, armazenamento de energia e sistemas do veículo. A engenharia de chassi deixa de atuar sobre uma massa dada e passa a influenciar a própria definição dessa massa, participando de decisões sobre capacidade da bateria, arquitetura estrutural e estratégia de frenagem.

CONCLUSÃO

Este artigo analisou a massa das baterias de tração como fator que reconfigura o projeto do chassi de veículos elétricos a bateria. A revisão da literatura mostrou que o acréscimo de massa associado ao armazenamento de energia não é um efeito localizado, mas uma condição que se propaga por

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

suspensão, pneus, rodas, direção, freios e estrutura, exigindo que cada um desses subsistemas seja redimensionado e que suas interações sejam reavaliadas desde a concepção do veículo.

No plano arquitetônico, verificou-se que a instalação da bateria sob o assoalho produz efeitos ambivalentes. De um lado, rebaixa o centro de gravidade, eleva o fator de estabilidade estática e favorece uma distribuição de massa equilibrada entre os eixos. De outro, aumenta as forças absolutas sobre todos os componentes e desencadeia massas secundárias que reduzem o espaço de instalação e realimentam o crescimento da massa total, como demonstram os estudos de modelagem paramétrica revisados.

Na suspensão, a necessidade de preservar frequências naturais e razões de amortecimento compatíveis com o conforto impõe molas mais rígidas e amortecedores capazes de gerar forças maiores. A variação de carga, especialmente relevante em veículos comerciais leves, e o aumento da massa não suspensa tornam o compromisso entre conforto, controle da roda e isolamento acústico mais difícil, o que explica o interesse crescente por suspensões pneumáticas, sistemas de nivelamento e amortecimento semiativo.

Nos pneus e nas rodas, a sensibilidade à carga reduz o coeficiente de atrito efetivo à medida que a carga vertical cresce, exigindo pneus de maior capacidade e, muitas vezes, aros maiores para acomodar freios mais robustos. Essa cadeia de decisões afeta a resistência ao rolamento, a massa não suspensa, o ruído de rodagem e o desgaste, que por sua vez se relaciona às emissões de partículas não exaustivas, tema que ganhou relevância científica e regulatória nos últimos anos.

Nos freios, a energia a ser dissipada cresce na mesma proporção da massa, o que impõe discos e pinças maiores para a condição mais severa. A frenagem regenerativa alivia a solicitação cotidiana dos freios de atrito e reduz as emissões de partículas, mas não dispensa o dimensionamento para o pior caso e cria problemas novos, como a corrosão dos discos e a necessidade de coordenação eletrônica precisa entre o freio elétrico e o freio hidráulico, com reflexos diretos na segurança e na durabilidade do sistema.

Na estrutura, o pacote de baterias tornou-se ao mesmo tempo carga a ser protegida e elemento estrutural em potencial. A proteção contra impactos inferiores e colisões laterais exige reforços que acrescentam massa, enquanto as estratégias de integração das células ao pacote e do pacote à carroceria buscam reduzir componentes redundantes. As baterias estruturais, ainda em estágio de pesquisa, indicam a possibilidade futura de eliminar a fronteira entre massa estrutural e massa de armazenamento de energia.

As implicações dessa condição ultrapassam o veículo. A literatura econômica e de segurança viária mostra que veículos mais pesados impõem riscos maiores aos demais usuários da via, e a regulação europeia passou a limitar as emissões de freios e a abrasão de pneus. No Brasil, o Programa Mover

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

associa incentivos a critérios de eficiência e desempenho ambiental, o que confere à gestão da massa relevância também econômica e estratégica para a indústria automotiva instalada no país.

Conclui-se que a redução e a gestão da massa devem ser tratadas como requisitos sistêmicos do projeto de veículos elétricos, e não como etapa final de otimização. Recomenda-se, como agenda de pesquisa, o aprofundamento de estudos experimentais sobre durabilidade de componentes de chassi em veículos elétricos sob condições de uso brasileiras, a quantificação das emissões não exaustivas em frotas nacionais e o desenvolvimento de métodos de projeto que avaliem de forma integrada bateria, estrutura e chassi desde as fases iniciais do desenvolvimento do produto.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, M. L.; AUFFHAMMER, M. Pounds that kill: the external costs of vehicle weight. **The Review of Economic Studies**, Oxford, v. 81, n. 2, p. 535-571, 2014. DOI: 10.1093/restud/rdt035.

ANTANAITIS, D. B. Effect of regenerative braking on foundation brake performance. **SAE International Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems**, Warrendale, v. 3, n. 2, p. 14-30, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-1681.

ARORA, S.; SHEN, W.; KAPOOR, A. Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 60, p. 1319-1331, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.013.

ASP, L. E. et al. A structural battery and its multifunctional performance. **Advanced Energy and Sustainability Research**, Weinheim, v. 2, n. 3, 2000093, 2021. DOI: 10.1002/aesr.202000093.

BEDDOWS, D. C. S.; HARRISON, R. M. PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 244, 117886, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117886.

BRASIL. **Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024**. Institui o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 28 jun. 2024.

CANDELA, A. et al. Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: review of the main materials and methods. **Heliyon**, Cambridge, v. 10, n. 8, e29728, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29728.

EHSANI, M. et al. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

GAO, Y.; EHSANI, M. **Electronic braking system of EV and HEV**: integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS. Warrendale: SAE International, 2001. (SAE Technical Paper 2001-01-2478).

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: Society of Automotive

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

Engineers, 1992.

GRIGORATOS, T.; MARTINI, G. Brake wear particle emissions: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 22, n. 4, p. 2491-2504, 2015. DOI: 10.1007/s11356-014-3696-8.

HEISSING, B.; ERSOY, M. (ed.). **Chassis handbook**: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.

KIM, H. C.; WALLINGTON, T. J. Life-cycle energy and greenhouse gas emission benefits of lightweighting in automobiles: review and harmonization. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 47, n. 12, p. 6089-6097, 2013. DOI: 10.1021/es3042115.

KÖNIG, A. et al. An overview of parameter and cost for battery electric vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, Basel, v. 12, n. 1, 21, 2021. DOI: 10.3390/wevj12010021.

LIMPERT, R. **Brake design and safety**. 3. ed. Warrendale: SAE International, 2011.

LV, C. et al. Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 92, p. 469-482, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.092.

NICOLETTI, L. et al. Parametric modeling of mass and volume effects for battery electric vehicles, with focus on the wheel components. **World Electric Vehicle Journal**, Basel, v. 11, n. 4, 63, 2020. DOI: 10.3390/wevj11040063.

PACEJKA, H. B. **Tire and vehicle dynamics**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.

REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. **The automotive chassis**: engineering principles. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

SAVARESI, S. M. et al. **Semi-active suspension control design for vehicles**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010.

SHAFFER, B.; AUFFHAMMER, M.; SAMARAS, C. Make electric vehicles lighter to maximize climate and safety benefits. **Nature**, London, v. 598, n. 7880, p. 254-256, 2021. DOI: 10.1038/d41586-021-02760-8.

TIMMERS, V. R. J. H.; ACHTEN, P. A. J. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 134, p. 10-17, 2016.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2024/1257 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativo à homologação de veículos a motor e motores e de sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a esses veículos, no que diz respeito às suas emissões e à durabilidade das baterias (Euro 7). **Jornal Oficial da União Europeia**, Luxemburgo, série L, 2024.

WALZ, M. C. **Trends in the static stability factor of passenger cars, light trucks, and vans**. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2005. (Technical Report DOT HS 809 868).

WEISS, M.; CLOOS, K. C.; HELMERS, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 28/04/2026 | aceito: 08/05/2026 | publicação: 19/06/2026

vehicles. **Environmental Sciences Europe**, Heidelberg, v. 32, 46, 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00307-8.

XIA, Y. et al. Damage of cells and battery packs due to ground impact. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 267, p. 78-97, 2014. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.05.078.

ZHU, J.; WIERZBICKI, T.; LI, W. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 378, p. 153-168, 2018. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.12.034.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.