

CADERNO DE TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS

Minerais Críticos & Materiais Estratégicos para a
Indústria de Mobilidade



APOIO INSTITUCIONAL:

mover fundep fundação de
apoio da UFMG

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA,
COMÉRCIO E SERVIÇOS



Associação Brasileira de Engenharia Automotiva - AEA

Marcus Vinícius Aguiar

Presidente

Everton Lopes

Vice-Presidente

Carlos Sakuramoto

Manufatura e Materiais

Instituto Hercílio Randon - IHR

Joel Boaretto

Diretor de Ciência e Tecnologia

Fundação de Apoio da UFMG - Fundep

Prof. Jaime Arturo Ramírez

Presidente

Ana Eliza Cruz Braga

Gerente de Programas

Thiago Leão

Líder de Comunicação - Programa Mover

Felipy Kind

Projeto Gráfico e Diagramação

Agradecimento especial:

Expressamos nosso sincero agradecimento às empresas, universidades, institutos de pesquisa e inovação, profissionais liberais, pesquisadores, professores e demais integrantes do Grupo de Trabalho de Materiais Estratégicos e Minerais Críticos da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA). A diversidade de conhecimentos, experiências e perspectivas reunidas por esse grupo foi essencial para a construção desta publicação, enriquecendo seu conteúdo com contribuições técnicas, científicas e industriais de elevada qualidade.

São Paulo, 2026.

Apoio Institucional:

Esta produção tem o apoio institucional da Fundação de Apoio da UFMG (Fundep), por meio do programa Mover (Mobilidade Verde e Inovação).

Agradecimentos



Expressamos nosso profundo reconhecimento ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), na pessoa do Uallace Moreira Lima, Secretário de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços, cuja liderança e compromisso com a política de inovação industrial foram fundamentais para a consolidação dos Programas Prioritários do Rota 2030, atualmente Mover (Mobilidade Verde e Inovação). O apoio institucional do Ministério criou as condições necessárias para o desenvolvimento deste estudo, que culmina na presente obra.

Registramos um agradecimento especial à Margarete Gandini, Diretora do Departamento de Desenvolvimento da Indústria de Alta-Média Complexidade Tecnológica do MDIC, cuja atuação estratégica no âmbito do Governo Federal tem sido decisiva para o fortalecimento das políticas de inovação, competitividade e desenvolvimento tecnológico da indústria brasileira.

Sua visão de futuro, pautada na promoção de abordagens inovadoras e na valorização da pesquisa aplicada como instrumento de transformação produtiva, contribuiu para ampliar o debate sobre os desafios estruturais da indústria nacional. Ao incentivar a construção de soluções capazes de

integrar sustentabilidade, inovação e competitividade, a Margarete Gandini tem desempenhado papel relevante na formulação de agendas voltadas ao reposicionamento tecnológico do Brasil em um cenário internacional cada vez mais orientado pela transição energética, pela transformação digital e pela economia de baixo carbono.

No contexto desta obra, dedicada à análise dos cenários tecnológicos relacionados aos materiais estratégicos e aos minerais críticos para a mobilidade, seu apoio foi especialmente significativo ao reforçar a importância de temas como economia circular, uso eficiente dos recursos naturais, segurança das cadeias globais de suprimento e desenvolvimento de novos modelos produtivos. Essa perspectiva contribuiu para consolidar o caráter propositivo deste trabalho, que busca oferecer uma reflexão fundamentada sobre os riscos associados à crescente demanda por recursos minerais, à necessidade de fortalecer a resiliência industrial e aos desafios da construção de uma economia mais sustentável e tecnologicamente soberana.

Destaca-se, igualmente, sua contribuição para a aproximação entre governo, academia e setor produtivo, fortalecendo os princípios da Hélice Tríplice como mecanismo de promoção da inovação, da geração de conhecimento e da competitividade industrial. Essa articulação tem sido essencial para a construção de políticas públicas capazes de alinhar desenvolvimento econômico, sustentabilidade ambiental e soberania tecnológica.

Por fim, expressamos nossa sincera gratidão ao Uallace e Margarete pela confiança, pelo apoio institucional e pelo compromisso permanente com a construção de um ambiente favorável à ciência, à inovação e ao desenvolvimento da indústria brasileira. Esperamos que esta obra represente uma contribuição relevante para o debate sobre os desafios e as oportunidades que marcarão a mobilidade e a gestão de recursos estratégicos nas próximas décadas.

| Sumário

Prefácio

Carlos Sakuramoto 5

Marcus Vinicius Aguiar 11

Everton Lopes 13

Joel Boaretto 15

Ana Eliza Cruz Braga 18

A Era da Extração Total 22

Introdução 32

Pilares Estratégicos 46

1. Energia 53

2. Ligas Metálicas 89

3. Polímeros 139

4. Minerais 189

5. Neomineração 247

**A Tríplice Hélice como incentivador da inovação em
Minerais Críticos e Materiais Estratégicos 303**

Prefácio

Carlos Sakuramoto

Diretor de Manufatura & Materiais e Minerais
Associação Brasileira de Engenharia
Automotiva (AEA)



O século XXI marca uma inflexão estrutural na dinâmica industrial global. Em nenhum outro momento recente os **materiais estratégicos** e os **minerais críticos** assumiram **papel** tão **central** na agenda tecnológica, geopolítica e industrial.

No **setor automotivo**, historicamente estruturado sobre cadeias produtivas amplas, densas e globalizadas, a **transição energética** ganha **relevância exponencial**.

Os veículos elétricos, os sistemas avançados de assistência à condução (ADAS), a conectividade embarcada e a manufatura inteligente elevaram exponencialmente a **dependência de materiais** como **lítio, níquel, cobalto, terras raras, grafite, semicondutores e ligas avançadas**. Mais do que insumos, **esses elementos tornam-se direcionadores de inovação, performance e sustentabilidade**.

Nesse contexto, **é fundamental destacar o papel contínuo da Diretoria de Manufatura, Materiais e Minerais da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA)**, cuja atuação, ao longo das duas últimas décadas, tem se caracterizado pela **capacidade de conectar política industrial, engenharia e inovação tecnológica de forma estruturada e pragmática**.

Desde a concepção e implementação do programa Inovar-Auto, passando pelo Rota 2030, até a atual estruturação do Mover (Mobilidade Verde e Inovação), **essa diretoria exerceu papel relevante na harmonização de diretrizes globais e na sua tradução em práticas concretas para o contexto do setor automotivo brasileiro**. Atuou e atua ativamente na **conceituação e na tradução dos conceitos**, contribuindo para **viabilizar projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I)**, **fortalecer a competitividade do setor e ampliar a inserção do Brasil nas agendas emergentes de descarbonização e eficiência tecnológica**.

Adicionalmente, essa trajetória foi marcada por uma capacidade singular de resposta em momentos críticos. **Durante a pandemia da COVID-19**, em um cenário de escassez aguda de respiradores hospitalares, **esta diretoria liderou em parceria com o SENAI-DN e com vários órgãos do governo federal uma iniciativa de alto impacto, voltada à organização, coordenação e execução de uma rede estruturada de reparo de ventiladores pulmonares**. Esta parceria mobilizou todas as montadoras automotivas e os Institutos SENAI de todo País, em uma ação que demonstrou, de forma inequívoca, o valor da engenharia aplicada, da infraestrutura produtiva e da articulação institucional em situação de emergências. Mais do que uma resposta pontual, tratou-se de um exemplo concreto da capacidade do ecossistema industrial brasileiro de atuar com rapidez, eficiência e propósito social.

A criação da Comissão Técnica de Materiais Estratégicos e Minerais Críticos na AEA reflete o reconhecimento de que os desafios contemporâneos demandam uma abordagem ainda mais integrada e sistêmica, conectando temas como **mineração, materiais avançados, manufatura, sustentabilidade e geopolítica tecnológica**.

O presente caderno de tendências tecnológicas nasce dessa **visão ampliada**. Seu propósito transcende a análise setorial estrita, propondo **uma visão integrada das tendências tecnológicas, dos riscos e das oportunidades associados ao desenvolvimento e à utilização de materiais estratégicos**. A abordagem adotada reconhece que as fronteiras entre setores se tornam progressivamente difusas: **soluções desenvolvidas para o setor automotivo encontram aplicações em energia, aeroespacial, defesa, eletrônica e infraestrutura**, configurando um ecossistema tecnológico altamente interdependente.

Mais do que mapear tendências, **este trabalho busca fomentar uma reflexão estratégica**. O Brasil, detentor de uma base mineral expressiva e com reconhecida competência industrial e científica, **tem diante de si uma oportunidade singular, de avançar de uma posição tradicional de produtor de commodities para uma inserção mais qualificada nas cadeias globais de valor, incorporando tecnologia, inovação e sustentabilidade**.

A Oportunidade da Próxima Década

Essa trajetória, no entanto, exige coordenação, visão de longo prazo e capacidade de execução. Requer investimentos consistentes em **pesquisa, desenvolvimento e inovação, fortalecimento das capacidades e do ecossistema industrial, formação de recursos humanos** especializados e um **ambiente regulatório previsível e competitivo**. Requer, sobretudo, a **articulação efetiva entre indústria, academia e governo** — eixo no qual a AEA historicamente tem desempenhado papel relevante.

Compreender quais serão os materiais do futuro e seus minerais é compreender o próprio futuro da indústria. Que esta “obra” contribua para orientar decisões, inspirar iniciativas e fortalecer o posicionamento do Brasil em um cenário cada vez mais orientado por tecnologia, sustentabilidade e inovação.

Marcus Vinicius Aguiar

Presidente

Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA)



Por mais de quatro décadas, a AEA (Associação Brasileira de Engenharia Automotiva) **tem participado dos principais debates técnicos do setor automotivo nacional**, em parceria com o Governo Federal, indústria e academia, com o objetivo de **suportar marcos regulatórios em favor do segmento responsável por 17% do PIB industrial** e sobretudo da sociedade civil, **com produtos mais seguros e menos poluentes ao meio ambiente**.

Mais recentemente, no entanto, a entidade passou a lançar **estudos que antecipam o futuro do setor automotivo**, da engenharia nacional e da proeminência do polo industrial brasileiro, **a exemplo deste “Caderno de Tendências Tecnológicas”**, desenvolvido pela Diretoria e Comissão Técnica de Manufatura, sob a coordenação de Carlos Sakuramoto e equipe.

Com essa publicação, de notório saber técnico, a AEA não deixou de **estudar e debater temas cotidianos da indústria**, mas **acrescentou** em seu portfólio a sua **vocação de antever, de se antecipar, com o propósito de mostrar os caminhos de performance da cadeia automotiva nacional**.

“**Caderno de Tendências Tecnológicas**” aborda minerais críticos e materiais estratégicos para a **indústria da mobilidade nos próximos dez anos**, período que pode se configurar como de **transição energética, circularidade e de soberania tecnológica**. E mais: será a **década da oportunidade única e decisiva para a consolidação do papel protagonista do Brasil na cadeia global da eletromobilidade**.

Em outras palavras, **este documento desvenda como a inovação pode e deve impactar na competitividade industrial** deste ou daquele país, na capacidade de **controlar insumos críticos, desenvolver cadeias intermediárias e estruturar modelos de economia circular**.

Trata-se de mais um trabalho de fôlego da AEA. Um documento de consulta permanente.

Parabéns a todos!

Boa leitura.

Muito Além da Eletrificação

Everton Lopes

Vice-presidente

Associação Brasileira de
Engenharia Automotiva (AEA)



A agenda de descarbonização no setor automotivo já ultrapassou a eletrificação como solução única. Até mesmo a China, berço do movimento de veículos eletrificados e protagonista da atual transformação global da indústria, já amplia o olhar para além dessa abordagem.

Nesse novo contexto, **ganha força a visão “do berço ao túmulo”, que considera todo o ciclo de vida do veículo**. Ao mesmo tempo, **cresce a complexidade da reconfiguração estrutural da indústria automotiva global**, impulsionada por pressões regulatórias cada vez mais **rigorosas** e pela **aceleração tecnológica**.

Esse cenário é refletido no “**Caderno de Tendências Tecnológicas**”, que apresenta um estudo **aprofundado sobre minerais críticos e materiais estratégicos para os veículos do futuro**. A agenda é clara: **mais eficiência energética, redução de massa, menor pegada de carbono, uso de materiais de baixo impacto, além de avanços em segurança e circularidade**.

O documento reúne **análises técnicas sobre polímeros, compósitos, neomineração, aço verde, regulação, rastreabilidade, economia circular, valorização de rejeitos e geopolítica de materiais críticos**. Acima de tudo, traz uma mensagem central: **inovação tecnológica e identificação de “janelas de oportunidade” serão decisivas para a competitividade dos polos produtivos, no Brasil e no mundo.**

Parabéns a Carlos Sakuramoto, diretor de Manufatura, e a toda a equipe da Comissão Técnica pelo trabalho.

Boa leitura.

A Exergia da Matéria e o Legado da Mobilidade

Joel Boaretto

Diretor de Ciência e Tecnologia
Instituto Hercílio Randon (IHR)



E se parte do verdadeiro potencial da transição energética já tivesse sido mobilizada e, ainda assim, permanecesse invisível aos nossos modelos de valor?

Ao longo de mais de um século, a indústria automobilística construiu uma extraordinária capacidade de transformar recursos naturais em mobilidade. Minerais foram extraídos, refinados, processados e convertidos em motores, chassis, baterias, sistemas eletrônicos e estruturas cada vez mais sofisticadas. Essa trajetória tornou possível conectar pessoas, impulsionar economias e redefinir a própria forma como a sociedade se desloca. Mas essa mesma lógica foi concebida sob a premissa da abundância: extrair, transformar, utilizar e descartar.

O resultado desse processo é silencioso, porém intrinsecamente insustentável.

Enquanto avançamos na busca por novos depósitos minerais para sustentar a eletrificação e as tecnologias emergentes, acumulamos, simultaneamente, enormes quantidades de rejeitos e materiais que já foram energeticamente mobilizados, concentrados e processados. São recursos que carregam consigo um patrimônio invisível: a energia já investida em sua existência.

Existe, portanto, uma assimetria fundamental. Continuamos olhando para o subsolo em busca das matérias-primas do futuro, enquanto uma parcela crescente desse futuro já se encontra acima da superfície, incorporada aos sistemas de descartes que produzimos durante o todo o período de exploração mineral.

É nesse ponto que o paradigma se torna frágil e o potencial de mudança surge como real e disponível.

A **Neomineração** emerge não como uma evolução incremental, mas como um reposicionamento conceitual. Ela amplia a compreensão do que é, de fato, um recurso. Rejeitos deixam de ser passivos acumulados e passam a ser reservas latentes. Resíduos deixam de representar um encerramento e passam a indicar continuidade de valor.

Há, contudo, uma dimensão ainda mais profunda nessa mudança, esses materiais não são neutros, eles carregam consigo uma história termodinâmica. Em outras palavras, ainda preservam **exergia**, a fração útil capaz de ser novamente convertida em trabalho, funcionalidade e riqueza.

Nesse sentido, a Neomineração transcende a lógica do reaproveitamento. Trata-se de uma abordagem orientada à **recuperação inteligente da exergia da matéria** uma forma mais sofisticada de acessar valor, não apenas pela natureza física dos elementos, mas pelo potencial energético intrínseco incorporada ao longo do seu histórico de vida.

Se a Neomineração ressignifica a origem do valor, são vertentes como a **nanotecnologia e a biomineração** que ampliam e refinam esse potencial atuando, respectivamente, na reconfiguração da matéria em sua escala mais fundamental e na extração seletiva, inspirada na precisão dos próprios processos naturais.



Na escala nano, a matéria deixa de ser apenas volume para se tornar função!

Pequenas quantidades passam a gerar efeitos desproporcionais. Propriedades são intensificadas, desempenhos redefinidos e a dependência por grandes volumes de recursos começa, gradualmente, a dar lugar à inteligência estrutural.

Da convergência dessas abordagens emerge um novo paradigma industrial, onde o diferencial competitivo deixa de estar exclusivamente na capacidade de extrair mais e passa a residir na capacidade de reconhecer valor onde antes havia apenas descarte.

Para a indústria automobilística, essa mudança é particularmente significativa. Os veículos do futuro não dependerão apenas de novas minas, mas também da capacidade de transformar o legado material das extrações anteriores em uma fonte contínua de recursos estratégicos.

A mobilidade sustentável não será construída apenas pela eletrificação ou pela digitalização, mas pela inteligência com que administrarmos a matéria e a energia já colocadas em circulação.

Este caderno nasce dessa convicção.

Porque, no limite da evolução tecnológica, a próxima revolução talvez não esteja em descobrir mais, mas em perceber melhor e compreender que o verdadeiro legado da mobilidade não está apenas nos veículos que construímos, mas na capacidade de fazer com que os materiais que lhes deram origem continuem gerando valor para as próximas gerações.

Conhecimento que antecede o futuro

Ana Eliza Cruz Braga

Gerente de Programas
Fundação de Apoio da UFMG
(Fundep)



A transformação da indústria da mobilidade representa um dos maiores desafios tecnológicos, econômicos e ambientais do século XXI. A eletrificação dos veículos, a digitalização dos sistemas produtivos, a busca pela neutralidade de carbono e a crescente complexidade das cadeias globais de suprimentos vêm redefinindo os fatores que determinam a competitividade das nações. Nesse contexto, minerais críticos e materiais estratégicos deixam de ser apenas insumos industriais e passam a ocupar posição central nas agendas de inovação, segurança econômica e desenvolvimento sustentável.

É nesse cenário que esta publicação se insere. Mais do que um levantamento de tendências, este Caderno Tecnológico oferece uma visão estruturada sobre os principais movimentos científicos, tecnológicos, regulatórios e industriais que moldarão a mobilidade nas próximas décadas. Ao reunir evidências, indicadores, análises prospectivas e referências internacionais, o estudo amplia a compreensão sobre os desafios e as oportunidades relacionados ao uso, processamento, reciclagem e gestão de materiais estratégicos, contribuindo para qualificar decisões de empresas, pesquisadores, formuladores de políticas públicas e demais atores do ecossistema de inovação.

Os dados apresentados ao longo desta obra evidenciam que a transição energética não será sustentada apenas por novas tecnologias, mas, sobretudo, pela capacidade de desenvolver cadeias produtivas resilientes, promover a circularidade dos materiais, agregar valor aos recursos minerais e fortalecer competências tecnológicas nacionais. Compreender essas transformações é condição essencial para que o Brasil possa ampliar sua inserção nas cadeias globais de valor e transformar sua riqueza mineral em vantagem competitiva baseada em conhecimento, inovação e sustentabilidade.

Como fundação de apoio à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Fundep tem a inovação como parte de sua missão institucional. Ao longo de sua trajetória de 50 anos, consolidou-se como uma organização capaz de conectar ciência, tecnologia e desenvolvimento econômico, apoiando projetos que transformam conhecimento em soluções concretas para a sociedade.

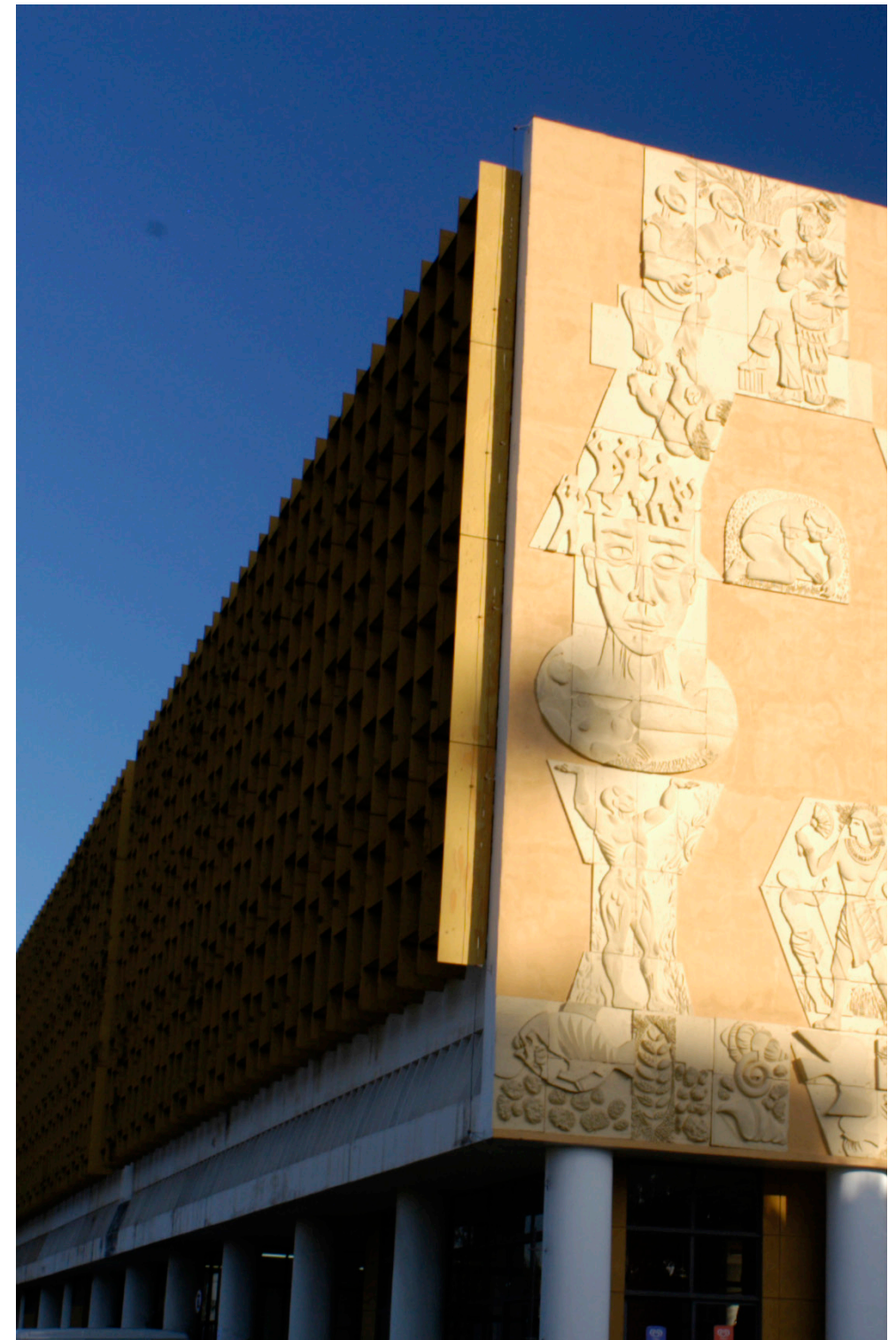
Essa vocação ganha ainda mais relevância na coordenação dos Programas Prioritários do Mover (Mobilidade Verde e Inovação). Nesse papel, a Fundep atua muito além da gestão de recursos e projetos. Trabalha como articuladora de um ambiente colaborativo que integra Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs), empresas, governo e entidades setoriais, promovendo condições para que pesquisas científicas se convertam em inovação tecnológica, desenvolvimento industrial e geração de valor para o país.

Essa interface entre academia e indústria tem permitido aproximar desafios reais do setor produtivo das competências científicas existentes nas instituições de pesquisa, estimulando projetos cooperativos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) capazes de acelerar o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à descarbonização, novos materiais, economia circular, mineração sustentável, manufatura avançada e mobilidade do futuro. Trata-se de uma atuação fundamentada nos princípios da Hélice Tríplice, reconhecendo que os grandes desafios tecnológicos somente podem ser enfrentados por meio da cooperação entre governo, universidades e empresas.

Nesse contexto, esta publicação também representa um instrumento de fortalecimento desse sistema. Ao organizar conhecimento técnico, identificar tendências emergentes e apontar oportunidades estratégicas para o Brasil, o caderno contribui para orientar investimentos, inspirar novos projetos de pesquisa e fomentar uma agenda nacional voltada à soberania tecnológica, à competitividade industrial e ao uso responsável dos recursos naturais.

Esperamos que este trabalho se torne uma referência para pesquisadores, empresas, gestores públicos e formuladores de políticas industriais, contribuindo para ampliar o debate sobre os caminhos que permitirão ao Brasil assumir uma posição de protagonismo na nova economia da mobilidade.

Mais do que compreender o futuro dos minerais críticos e dos materiais estratégicos, esta obra convida seus leitores a refletirem sobre o futuro da própria indústria brasileira e sobre o papel da inovação colaborativa na construção de um desenvolvimento mais sustentável, competitivo, tecnológico e soberano.



A Era da Extração Total

A maior transformação física da história da humanidade

Nunca na história da humanidade exercemos tanta pressão física sobre o planeta.



Todos os anos, a civilização extrai da Terra mais de 100 bilhões de toneladas de materiais (biomassa, minerais, metais e combustíveis fósseis). Há apenas cinquenta anos, esse volume era inferior a 30 bilhões de toneladas. Em apenas meio século, triplicamos a quantidade de matéria removida da crosta terrestre, impulsionados pelo crescimento populacional, urbanização, industrialização e expansão do consumo. (INTERNATIONAL RESOURCE PANEL, 2024; FLECK, 2024).

Esse não é apenas um fenômeno econômico. É uma transformação física sem precedentes na história da civilização.



A humanidade extrai mais de 100 bilhões de toneladas de recursos naturais por ano.

Em apenas 50 anos, triplicamos a extração global de materiais.

Hoje, cada habitante do planeta consome, em média, **mais de 13 toneladas de materiais por ano**, número que ultrapassa **25 toneladas anuais por pessoa** nas economias mais desenvolvidas. (INTERNATIONAL RESOURCE PANEL, 2024).

A escala dessa exploração desafia qualquer percepção humana. Apenas areia e agregados (base invisível da urbanização moderna) representam **40 a 50 bilhões de toneladas anuais**, tornando-se o recurso sólido mais explorado do planeta.

Ao mesmo tempo, a humanidade já ultrapassou a capacidade natural de regeneração da Terra e consome recursos equivalentes a **1,6 planeta por ano** para sustentar seu atual padrão de desenvolvimento. Em 2025, o orçamento anual de recursos naturais foi esgotado ainda no mês de julho, deixando a humanidade em déficit ecológico durante o restante do ano.

Estamos removendo recursos da Terra mais rapidamente do que a natureza consegue repô-los.



Até 50 bilhões de toneladas de areia são extraídas todos os anos.

Consumimos recursos equivalentes a 1,6 planeta Terra por ano.

Em 2025, os recursos naturais do ano acabaram em julho.

A Materialidade do Bem-estar

Todo indicador de desenvolvimento moderno possui uma origem comum: **a extração de recursos naturais**.

Mobilidade, infraestrutura, conectividade, energia, digitalização e qualidade de vida dependem diretamente da conversão de matéria-prima em bens, serviços e tecnologias.

Estradas, cidades, veículos, data centers, turbinas eólicas, baterias, linhas de transmissão e edifícios representam diferentes manifestações de um mesmo processo físico: transformar recursos naturais em bem-estar humano.

Essa transformação, entretanto, possui elevado custo ambiental.

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2019), **a extração e o processamento de materiais respondem por cerca de metade das emissões globais de gases de efeito estufa e por mais de 90% da perda de biodiversidade e do estresse hídrico**.

O conforto da sociedade moderna é sustentado por uma crescente pressão sobre os estoques



Todo avanço tecnológico começa com a extração de recursos naturais.

50% das emissões globais de gases de efeito estufa estão associadas à extração e ao processamento de materiais.

Mais de 90% da perda de biodiversidade está relacionada ao uso de recursos naturais.

A Mobilidade como Síntese da Extração

Poucos produtos representam tão claramente essa lógica quanto o automóvel.

Hoje, **mais de 1,6 bilhão de veículos circulam pelo planeta**, funcionando como verdadeiros estoques móveis de aço, alumínio, cobre, polímeros, semicondutores e dezenas de outros materiais.

Cada veículo incorpora aproximadamente **1,4 tonelada de matéria**, incluindo cerca de **900 kg de aço** em sua estrutura (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2024). Multiplicada por uma frota global em constante expansão, a mobilidade transforma-se em um dos maiores fluxos materiais da economia mundial.



Mais de 1,6 bilhão de veículos circulam atualmente no mundo.

Cada automóvel concentra cerca de 1,4 tonelada de materiais.

A Aceleração Invisível da Transição Energética

A transição energética não reduz a dependência de recursos naturais.

Ela **aumenta** essa dependência.

Cada veículo elétrico, bateria, turbina eólica ou sistema fotovoltaico incorpora volumes significativamente maiores de cobre, níquel, lítio, grafite, terras raras e diversos minerais críticos.

A economia deixa de depender predominantemente de combustíveis fósseis e passa a depender da disponibilidade física de minerais estratégicos.

A transição energética é, simultaneamente, uma transição mineral.



Tecnologias limpas exigem mais materiais e mais minerais críticos.

A descarbonização aumenta a demanda por recursos minerais estratégicos.

A Encruzilhada do Modelo Linear

Como antecipou Stuart Hart (2005), o capitalismo encontra-se em uma encruzilhada histórica.

O modelo baseado em **extrair, produzir, consumir e descartar** tornou-se incompatível com uma economia que cresce continuamente sobre um planeta de recursos finitos.

O crescimento da população, da renda, do consumo e da produção amplia continuamente a extração e o descarte, sem incorporar mecanismos equivalentes de regeneração dos recursos naturais.

O sistema econômico cresce.



O modelo linear ignora os limites físicos do planeta.

O crescimento econômico continua sem incorporar a recomposição natural dos recursos.

O Limite Invisível

O maior desafio do século XXI não será produzir mais.

Será produzir melhor.

O planeta dificilmente entrará em colapso por falta imediata de recursos, mas poderá atingir a saturação de seus fluxos materiais, de seus estoques e da capacidade de regeneração dos ecossistemas.

A questão deixa de ser **se existem recursos suficientes**.

Passa a ser **se conseguiremos utilizá-los sem comprometer os sistemas naturais que sustentam**



**O verdadeiro limite
está na capacidade de
regeneração do planeta.**

**A economia circular
deixa de ser opção
e passa a ser
necessidade.**

**O desafio não é apenas
extrair. É reintegrar os
materiais ao sistema
produtivo.**

Epílogo: A Civilização Mineral

O século XXI será definido menos pela disponibilidade de energia e cada vez mais pela disponibilidade de materiais.

O bem-estar das sociedades dependerá da capacidade de acessar, transformar, utilizar e reinserir recursos naturais em escala planetária.

A escolha descrita por Stuart Hart permanece atual.

Não será uma escolha entre crescimento econômico e preservação ambiental.

Será uma escolha entre **antecipar os limites físicos do planeta** ou ultrapassá-los e enfrentar



**O século XXI será a era dos
minerais críticos.**

**A escolha não será entre crescer
ou preservar. Será entre antecipar
os limites ou sofrer suas
consequências.**

**A competitividade das nações
dependerá da gestão inteligente
dos recursos naturais.**

Se a economia do século XX foi movida pelo petróleo, a economia da mobilidade do século XXI será moldada pela disponibilidade de minerais críticos e pela capacidade de mantê-los circulando na economia.

Introdução

A indústria automotiva global está no centro de uma reconfiguração estrutural, tecnológica e geopolítica, as quais são marcadas pela transição para a mobilidade elétrica, pressão por redução de emissões no ciclo de vida e competição por cadeias de suprimentos críticos.

A competitividade das montadoras e de sua cadeia de fornecimento passa por decisões que vão desde a seleção dos materiais e do processamento, requisitos de desempenho e ciclo de vida do veículo. **A transição para veículos eletrificados altera a demanda por materiais e rotas de manufatura**, ao mesmo tempo em que há um **redesenho da geopolítica industrial relacionada à energia, mobilidade e suprimentos**.

A **redução de emissões** tornou-se a principal **força motriz para a inovação** no setor automotivo. As principais estratégias convergem para **eficiência e redução de peso, descarbonização, materiais de baixo impacto, segurança e circularidade**. A transição para uma arquitetura veicular baseada em materiais leves não apenas responde às pressões ambientais, mas **redefine a cadeia do ciclo de vida e a reciclabilidade desses materiais**.

O **setor automotivo** deixa de ser uma cadeia linear para se tornar um **ecossistema complexo que abrange diversos setores interconectados**. Ao mesmo tempo, a pressão sobre as cadeias de suprimento de minerais críticos incentiva as montadoras a buscarem inovações, assim como a importância da economia circular no setor, essenciais para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

Diante das demandas globais relacionadas à transição energética, há uma **necessidade crescente de matérias primas de origem mineral**. Porém, os **minerais** são recursos de uma “safra única”, não são renováveis. Desta forma, torna-se imperativo adotar **soluções que promovam a competitividade do setor, a circularidade e a eficiência no uso destas matérias-primas**.

Apesar da abundância de depósitos minerais, tecnologias de exploração, extração e processamento ainda não são totalmente dominadas, tornando esses minerais conhecidos como críticos.

Sendo assim, há a necessidade iminente de **inovação** de maneira a **transformar os paradigmas produtivos da indústria de mineração**, que opera majoritariamente sob um modelo linear de extração, fabricação e descarte. Isso se torna uma exigência frente ao cenário de competitividade global, bem como, ao esgotamento dos recursos minerais.

A transição para mobilidade elétrica aumentou a **importância de minerais críticos, cuja disponibilidade e volatilidade de preços afetam decisões de arquitetura e fornecimento global**. Como consequência, isso tem impulsionado o desenvolvimento da economia circular, materiais reciclados e formulações que permitam a reciclagem.

A transição energética não se dará apenas por eficiência tecnológica, mas será acompanhada por mudanças regulatórias e competição entre blocos econômicos, amplamente influenciada por políticas industriais.

O **Inflation Reduction Act (IRA)** nos Estados Unidos redefine seus incentivos, onde estabelece **subsídios para veículos elétricos, mas impõe restrições rigorosas sobre a origem dos materiais críticos**, o que afeta diretamente o suprimento global de baterias, magnetos e semicondutores. O **Battery Regulation 2023** na União Europeia, por sua vez, define requisitos obrigatórios mínimos a partir de 2030, com **rastreabilidade integral dos materiais, conteúdo reciclado mínimo, pegada de carbono e metas de sustentabilidade** que tornam a cadeia de suprimentos mais transparente e controlada.

Essa competição regulatória global cria novos requisitos técnicos e estratégicos para inserção de países como o **Brasil** na cadeia automotiva, a qual não se limita apenas a veículos elétricos. Nosso país possui um **conjunto promissor de vantagens em relação ao cenário global**, porém, com alguns gargalos, uma vez que não há cadeias consolidadas, deixando-o em posição vulnerável. Devido aos recursos naturais abundantes e à matriz energética renovável, o **Brasil, possui janela de oportunidade estratégica para nichos específicos**.

A competitividade automotiva dependerá diretamente da capacidade de controlar os insumos críticos, onde o período entre 2026 e 2035 tem caráter decisivo na consolidação de um papel protagonista na cadeia global da eletromobilidade.

A transição automotiva global se pautará pela competição das cadeias de materiais críticos que redefinirá quem terá o papel de produtor estratégico ou dependente.

De fato, o **Brasil possui vantagens relevantes** (matriz elétrica limpa, reservas minerais e base industrial instalada), **mas possui desafios na capacidade produtiva em etapas intermediárias da cadeia** (separação e refino), que são as **etapas de maior valor agregado**. Neste contexto, o desenvolvimento de rotas de processamento e extração alinhadas à sustentabilidade e à circularidade ganham relevância.

Os **minerais críticos** estão sendo a “**febre do momento**” porque são essenciais para a indústria de **alta tecnologia, energias renováveis e defesa**, essenciais para a **fabricação de ímãs permanentes** de alta potência, **motores de veículos elétricos, turbinas eólicas e eletrônicos de consumo**. Todos esses campos de aplicação estão relacionados à transição energética e descarbonização.

No entanto, existem outros materiais de igual importância para a mobilidade do futuro. Os **materiais compósitos** vêm substituindo materiais tradicionais em aplicações que requerem a **combinação de elevada resistência mecânica, baixo peso e durabilidade**. Na área automotiva, **peças de carroceria, chassi e componentes internos** para redução de peso e aumento da eficiência e autônoma podem ser produzidos em materiais compósitos.

Materiais cerâmicos, por sua vez, **são utilizados em aplicações que exigem alta resistência térmica, durabilidade e isolamento**. A indústria eletrônica aplica as cerâmicas avançadas na **produção de isoladores elétricos, capacitores e semicondutores**, essenciais para a eletrificação. **Componentes de motores e sensores** na indústria automotiva também exigem esse tipo de material.

Metais tradicionais, como aço, alumínio e suas ligas, são utilizados majoritariamente na **produção de chapas, motores, componentes estruturais e acabamentos de veículos**. O **aço** é amplamente utilizado devido à sua **resistência e capacidade de suportar altas tensões**, sendo comum em aplicações “pesadas”. O **alumínio**, por outro lado, é leve e resistente à corrosão, tornando-o ideal para componentes que exigem mobilidade e durabilidade. O **cobre**, por sua vez, é excelente condutor elétrico, estando presente nos sistemas elétricos e eletrônicos dentro das máquinas.

Uma das principais características dos **metais** na indústria é a **possibilidade de serem recicláveis**. Os benefícios proporcionados pela reciclagem do metal são a **redução da necessidade de extração de novos recursos da natureza, diminuição do consumo de energia e o impacto econômico positivo**. Tais aspectos vão ao encontro das estratégias de redução de impacto socioambiental e sustentabilidade.

O **controle da pegada de carbono** do produto exige que a **indústria monitore as emissões desde a extração da matéria-prima até as montadoras**. As montadoras, por sua vez, têm priorizado materiais com adição de reciclados, uma vez que a **substituição de materiais virgens por alternativas secundárias é uma estratégia direta para reduzir o impacto ambiental incorporado nos veículos**, sejam eles à combustão ou elétricos.

Com isso, o ciclo de vida do material tem ganhado tanta relevância quanto as próprias emissões do veículo.

As **tendências regulatórias globais para veículos elétricos** estão evoluindo de uma abordagem focada apenas na eficiência energética para uma visão de **responsabilidade estendida sobre todo o ciclo de vida dos materiais**. Uma das iniciativas mais impactantes é o estabelecimento de novos regulamentos para baterias, que exige o registro detalhado de todos os materiais constituintes. Essa regulamentação **visa garantir que, ao final da vida útil, cada material possa ser rastreado e encaminhado para processos de reciclagem adequados, descarte ou incineração adequada**.

Materiais que compõem sensores, placas de circuito e módulos de controle precisam atender a diretrizes de descarte similares a de celulares e computadores. Isso tem impulsionado o desenvolvimento de componentes desmontáveis ou quimicamente recicláveis, que permitam a recuperação de metais preciosos e minerais críticos contidos nos sistemas eletrônicos sem contaminar o fluxo de reciclagem.

Na economia circular, o descomissionamento e a reciclagem tem ganhado destaque, impulsionada por exigências regulatórias de sustentabilidade.

A presença de materiais “proibidos” impede que alguns materiais sejam reintroduzidos no ciclo produtivo como matéria-prima reciclada. Portanto, a **transição para a economia circular exige que a reciclabilidade seja projetada ainda na concepção do produto**.



Desta forma, a circularidade avança para além da reciclagem mecânica convencional, abrangendo também a reciclagem química.

O intuito é estabelecer um **fluxo que conecte a origem secundária dos materiais** (resíduos de mineração, descomissionamento e atividades industriais correlatas) **a uma cadeia de fornecimento industrial**, assegurando desempenho, rastreabilidade e redução de emissões. **No entanto, a infraestrutura** voltada para a economia circular **ainda apresenta lacunas em relação à reciclagem química e ao descomissionamento de veículos**.

É fato que a **transição energética depende de minerais**, porém, a **longevidade desse sistema depende da eficiência com que esses materiais finitos serão reciclados e reutilizados**. As tendências tecnológicas no setor automotivo fomentam a criação de **uma nova cadeia de fornecimento sustentável, baseada em neomineração, reuso de materiais automotivos e aproveitamento de resíduos e subprodutos industriais**. É uma possibilidade para integrar tecnologias emergentes, inovação e articulação com a cadeia produtiva existente. Esse conjunto de ações contribuem de forma decisiva para o avanço da independência tecnológica do Brasil no setor da mobilidade e soberania na produção de insumos estratégicos para a transição energética.

Dentro do contexto de neomineração, a mineração secundária trata da recuperação de matérias-primas a partir de resíduos, rejeitos de barragens e minerais secundários formados por intemperismo.

A mineração urbana, por sua vez, é outro conceito da neomineração, o qual consiste na recuperação de metais preciosos e minerais críticos de resíduos eletrônicos, os quais tem alto potencial econômico. Ambos os conceitos estão inseridos dentro da estratégia de circularidade.

A reutilização de resíduos de mineração para a produção de novos materiais, **reduz a necessidade da extração**, bem como, a própria geração dos resíduos. Este tipo de mineração mitiga impactos ambientais, pois, **diferentemente da mineração primária (extração direta)**, **reutiliza materiais, reduzindo custos de produção e a pressão sobre recursos naturais**. A mineração secundária foca no **reprocessamento de materiais já extraídos, alinhando-se à sustentabilidade**.

A adoção de **práticas sustentáveis de mineração**, **garantem o fornecimento de minerais essenciais para a transição energética**. Adicionalmente, a **diversificação da cadeia de suprimentos para evitar monopólios e formar estoques estratégicos** contribui mitigar a volatilidade dos preços e riscos de abastecimento. A mineração urbana, por sua vez, requer sistemas de logística reversa para reciclar baterias e outros componentes eletrônicos, minerando materiais já em circulação.

Implementar tecnologias para recuperar minerais críticos de lixo eletrônico, baterias usadas e sucata industrial, bem como, reprocessar barragens e pilhas de estéril de minerações para extrair minerais remanescentes e reduzir o passivo ambiental são estratégias para transformar resíduos em materiais de alto valor agregado.

As principais vantagens residem na **sustentabilidade, redução da contaminação ambiental e fornecimento de matérias-primas críticas**. Os principais desafios, por sua vez, envolvem a **necessidade de desenvolver tecnologias** e aprimorar a logística reversa para viabilizar a reciclagem em larga escala.

No curto prazo, **a transição para a mobilidade sustentável não irá envolver mudanças disruptivas**, mas sim, a **substituição gradual por alternativas com menor impacto ambiental e compatíveis com a infraestrutura já disponível**. Há a tendência da implementação de regulamentações sobre reciclabilidade, incentivando inovações nessa área. A adoção imediata de soluções sustentáveis é impulsionada principalmente pela **otimização de materiais já disponíveis comercialmente e rotas de reciclagem convencionais**.



A **redução de massa** representa a via mais rápida para **otimizar a eficiência energética no curto prazo, reduzindo o consumo de combustível e emissões de CO2** em motores a combustão, e, **estendendo a autonomia em veículos elétricos e híbridos**. A principal oportunidade reside na substituição de ligas metálicas pesadas por materiais mais leves (aços avançados, alumínio e compósitos poliméricos).

Rotas de circularidade de primeira geração devem se consolidar como **soluções tecnicamente e economicamente viáveis**, permitindo a **redução simultânea da pegada de carbono e do consumo de matérias-primas primárias**. Tais estratégias irão preparar a cadeia de suprimentos para futuras pressões fiscais e regulatórias. No entanto, o **descomissionamento dos automóveis é um desafio no horizonte de curto prazo**, assim como, dificuldades associadas à **complexidade dos resíduos**, ambos fatores importantes para a economia circular.

No horizonte próximo, as **oportunidades** concentram-se **no atendimento às regulações ambientais mais rigorosas, melhoria de eficiência energética e redução de custos** associados aos materiais estratégicos e críticos. As diretrizes regulatórias introduzem **critérios de rastreabilidade, conteúdo local e sustentabilidade**, com impacto direto sobre a cadeia de minerais.

Por outro lado, no médio prazo, deve haver uma **redução da dispersão e maior especialização das tecnologias**, indicando **transição** de uma fase exploratória **para uma fase de aprimoramento, consolidação e escalonamento das rotas tecnológicas emergentes**. O foco não será a expansão, mas sim, o refinamento das soluções já priorizadas, preparando os sistemas para produção em escala. O escalonamento industrial exigirá **domínio em engenharia de processamento e beneficiamento dos minerais**, uma vez que haverá o desafio do **custo tecnológico associado a escalabilidade, disponibilidade de insumos, bem como, a maturação da cadeia de suprimentos**.

A transição para uma economia circular no horizonte de médio prazo exigirá um fluxo constante e volumoso, o que demanda sistemas de logística e triagem automatizada. Neste âmbito, também haverá a **dificuldade de escalabilidade da reciclagem química em território nacional**. A transição do laboratório para a indústria requer a **de verticalização da cadeia**, com domínio de **rotas de projeto e processamento**, onde as políticas industriais e a estabilidade regulatória serão elementos centrais para reduzir riscos e acelerar os desenvolvimentos.

Enquanto o curto prazo está associado à consolidação de tecnologias maduras e o médio prazo à especialização e verticalização dos insumos críticos, o longo prazo combina continuidade e abertura para novas tecnologias. O **longo prazo se caracterizará por otimização tecnológica e consolidação industrial** para uma mobilidade mais eficiente, eletrificada e tecnologicamente madura.

O **avanço de materiais funcionais inteligentes, por sua vez, redefinirá o papel dos materiais no setor automotivo**. A arquitetura automotiva será orientada para o **desenvolvimento de veículos concebidos desde a fase de projeto para minimizar impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida, viabilizando estratégias avançadas de economia circular, consumo energético e uso racional de matéria-prima**.

No horizonte de longo prazo, o esforço não estará exclusivamente voltado à engenharia de materiais, mas também, **ao processamento e extração de recursos naturais**. A **mineração estratégica** ocupará posição central com rotas **produtivas avançadas e recuperação de elementos críticos**, evidenciando visão sistêmica da cadeia. A sustentabilidade e mitigação de dependência de minerais críticos também ganharão relevância. O escopo será ampliado para integrar a cadeia produtiva e os impactos ambientais em uma abordagem mais abrangente.

Os **principais desafios no longo prazo** serão a **baixa maturidade tecnológica e o risco de escalonamento**, uma vez que isso exigirá **consolidação de tecnologias, estabilidade de matérias-primas e de processo**. As barreiras regulatórias irão incorporar exigências ambientais e de rastreabilidade mais rigorosas, alinhadas às metas globais de neutralidade climática. Regulamentações sobre **rastreabilidade de cadeias minerais reforçarão a necessidade de transparência quanto à origem dos insumos, pegada de carbono e conformidade socioambiental**.

Diante do cenário que se aproxima, deve-se ter a clareza de que **a força motriz que transforma ideias em inovações de alto impacto é a formação de capital intelectual de alto nível**, responsável por integrar conhecimento técnico, processos organizacionais e redes estratégicas, de maneira a atuar como um sistema que sustenta a competitividade e a disrupção. O capital humano é onde está a origem da criatividade, o qual representa as competências, experiências e a inteligência. **A geração de ideias disruptivas é proporcionada por profissionais qualificados**, os quais possuem a base cognitiva necessária para **identificar lacunas de mercado e propor soluções que fogem do óbvio**.

Para materializar as ideias e soluções, deve-se ter o **apoio do capital estrutural**, responsável por **escalar a inovação, englobar sistemas, bancos de dados, processos e propriedade intelectual**, garantindo que as ideias sejam formalizadas e replicadas com eficiência. Processos organizacionais ágeis, por sua vez, permitem que protótipos sejam testados e escalados, **transformando a teoria em um produto viável no mercado**.

Ainda, o **capital relacional** é responsável pela **alavancagem externa** e refere-se ao **valor das relações com clientes, fornecedores, parceiros e universidades**. O relacionamento estratégico permite a **troca de informações com o mercado, antecipando tendências e necessidades que os consumidores ainda não verbalizaram**.

Portanto, o capital humano gera a ideia, o capital estrutural a transforma em processo/produto, e o capital relacional garante que essa inovação chegue ao mercado e gere resultados financeiros e sociais. A colaboração entre esses pilares é responsável pela criação de valor.

Para mitigar riscos e aproveitar oportunidades, é fundamental fortalecer a infraestrutura nacional. É **necessário criar rotas industriais competitivas, com ênfase em cadeias de produção sustentáveis, reduzindo a dependência de insumos importados e alinhando a indústria automotiva às metas de economia circular e sustentabilidade**. Essas ações integradas visam fortalecer a capacidade tecnológica nacional e aumentar a competitividade da indústria.

Há um movimento crescente de integração vertical nas cadeias tecnológicas, formando um **ecossistema de inovação marcado por uma integração entre diferentes setores**, configurando um ambiente no qual a **coprodução tecnológica é condição necessária para avanço competitivo**. Esse arranjo revela um ecossistema altamente colaborativo, no qual fabricantes e **centros de pesquisa compartilham conhecimento, alinham prioridades tecnológicas e direcionam investimentos estratégicos para assegurar domínio sobre a transição energética e a sustentabilidade**.



A interação colaborativa entre universidade, indústria e governo para fomentar inovação, desenvolvimento econômico e social é constituída como a tríplice hélice do poder.

Essa abordagem é crucial para a **economia baseada no conhecimento, onde a inovação é a base do crescimento e competitividade**. Enquanto a **universidade produz conhecimento** científico, tecnologia e profissionais qualificados, a **indústria aplica** o conhecimento e inova para atender as demandas de mercado, e o **governo, por sua vez, atua como facilitador**, criando políticas públicas, financiamento e redução de burocracia.

A universidade foca no **desenvolvimento de materiais alternativos, tecnologias de mineração de baixo carbono e processos de economia circular para combater a exaustão de recursos**. A **indústria**, por sua vez, investe na aplicação dessas inovações, **adotando práticas de ESG** e implementando **tecnologias de eficiência energética e descarbonização** em toda a cadeia de suprimentos. Por fim, o **governo estabelece marcos regulatórios, políticas públicas, incentivos fiscais e diretrizes** que garantem **segurança jurídica, soberania mineral e financiamento** para projetos de transição e economia circular.

Desta forma, os ecossistemas de inovação criados pela tríplice hélice integram pesquisa aplicada, políticas públicas de descarbonização e tecnologias de mineração sustentável.

Essa colaboração acelera a transição energética através da **substituição de materiais, reciclagem de resíduos e verticalização da cadeia produtiva, reduzindo a dependência externa sobre minerais e mitigando o impacto ambiental**.

Uma **vantagem competitiva brasileira** reside na **abundância de recursos naturais e minerais**. Embora persistam desafios relacionados ao escalonamento industrial, essa base constitui um **ativo estratégico para a diferenciação em materiais sustentáveis**, especialmente para aplicações automotivas que demandam redução de peso e menor pegada ambiental.

O **mercado automotivo brasileiro é expressivo**. Essa característica facilita o **desenvolvimento conjunto de soluções customizadas, reduz custos logísticos e estimula a internalização de competências tecnológicas**, incentivando a inovação local e a consolidação de uma cadeia produtiva mais competitiva e sustentável. Adicionalmente, há o potencial associado à economia circular e à **transição para modelos produtivos ambientalmente responsáveis**.

O intuito é fomentar a transição energética no setor automotivo brasileiro, promovendo **inovação tecnológica, descarbonização, circularidade e neomineração**.

Essa abordagem destaca a importância da **rastreabilidade e desmontabilidade** como critérios-chave para a circularidade dos materiais e a eficiência dos processos de transformação de “resíduos” em matérias-primas. Isso reforça o papel da ciência e da tecnologia.

Do ponto de vista de infraestrutura, o **Brasil combina diferentes rotas e é necessário analisar a cadeia completa.**

Para o Brasil, capturar competitividade exige **evoluir o que já tem escala e alinhar modernização industrial com a agenda de descarbonização.** As necessidades mais imediatas consistem primeiramente em **fortalecer infraestrutura de engenharia aplicada e investir em capacidade de processo e controle de qualidade de processos da manufatura.** Posteriormente, será necessário **desenvolver a cadeia e as especificações para reciclagem automotiva,** incluindo rastreabilidade, separação e limites de impurezas.

Um caminho interessante para o Brasil **é ampliar o uso de sucata e rotas de menor emissão na indústria local,** reforçando a circularidade. **As tendências tendem a se consolidar onde existe base industrial instalada e onde já se tem domínio (aços e alumínio).** Já existem cadeias de reciclagem de metal consolidadas e um “mercado secundário” funcional, onde há oportunidade para organizar melhor essa cadeia.

A **prioridade estratégica** deve se concentrar **na redução de assimetrias tecnológicas e no fortalecimento das bases industriais já existentes.** O Brasil já possui uma **matriz elétrica** relativamente mais **sustentável** e pode usar isso **para reduzir a pegada de carbono dos materiais,** principalmente quando **combinado com uso de reciclado.** Simultaneamente, há elevada disponibilidade geológica de diversos minerais relevantes, porém, com **lacunas significativas na agregação de valor tecnológico e no refino avançado.** Será necessária a **melhoria de rotas de beneficiamento, purificação e controle de impurezas.**

Políticas de incentivo à verticalização parcial da produção mineral podem reduzir dependências externas e ampliar a competitividade nacional.

Será fundamental estruturar infraestruturas de refino avançado e projetos que integrem mineração e neomineração, transformação química e indústria automotiva.

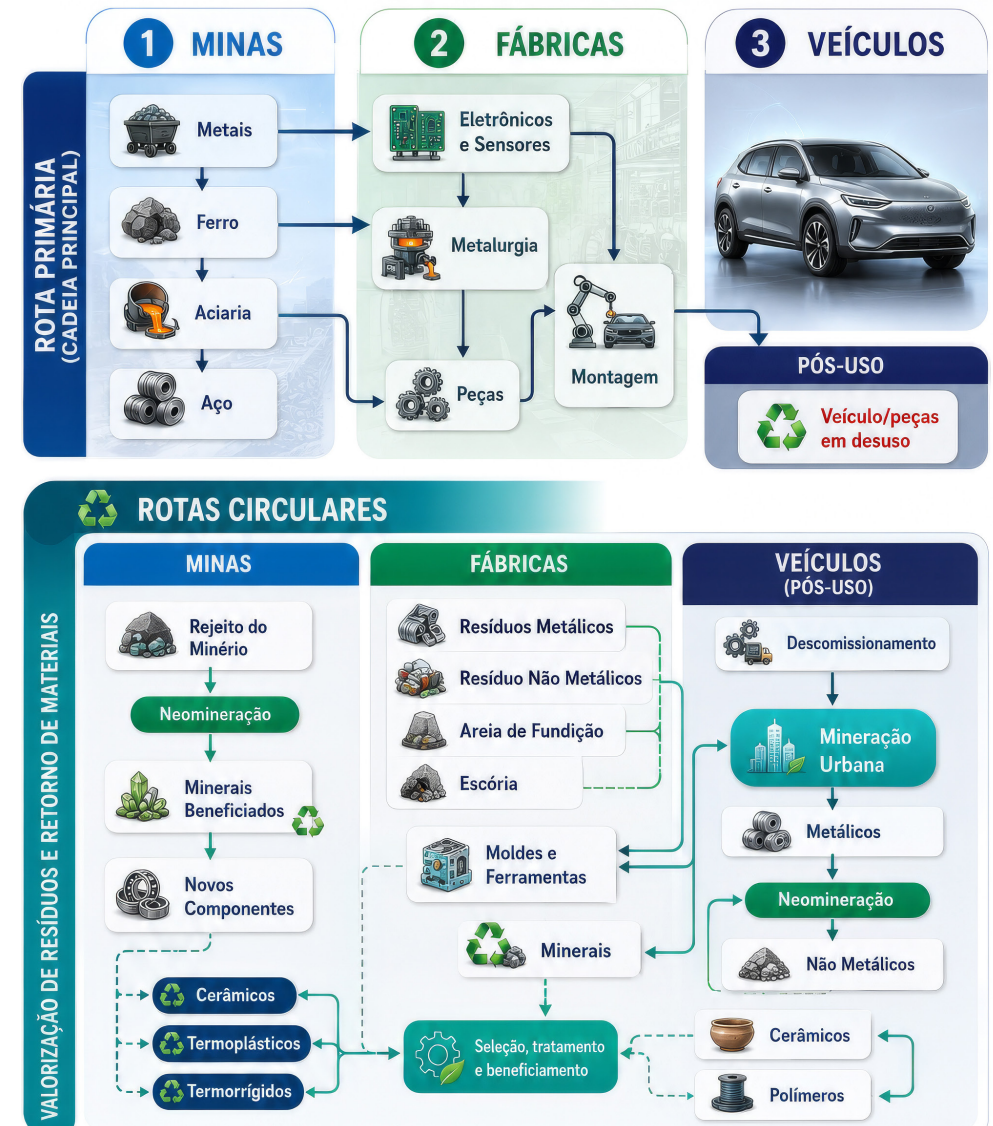
A estratégia deve buscar liderança regional em tecnologias de processamento mineral de baixo carbono, integração com economia circular, desenvolvimento de rotas eletroquímicas, uso de hidrogênio verde em processos metalúrgicos, reciclagem avançada de minerais críticos e integração digital de cadeias produtivas.

Liderar a inovação em materiais estratégicos significa, em última instância, ditar o futuro da mobilidade e garantir a soberania tecnológica nacional.



Fluxo de materiais e processos na Cadeia Produtiva Automotiva

O fluxo ao lado integra as rotas primárias de cadeia automotiva às rotas circulares, evidenciando como materiais, processos e estratégias industriais se conectam para **promover sustentabilidade e geração de valor ao longo de todo o ciclo de vida.**



PILARES ESTRATÉGICOS

Os **pilares estratégicos** apresentados neste caderno foram definidos com o objetivo de **estruturar a análise das principais tendências tecnológicas** com impacto direto **na indústria e na inovação**.

Esses domínios concentram **avanços relevantes** em materiais, processos e sustentabilidade, além de apresentarem **forte potencial de transformação nos modelos produtivos**. Ao organizar o conteúdo a partir desses pilares, busca-se **facilitar a compreensão das tendências, priorizar temas estratégicos e orientar decisões relacionadas a desenvolvimento tecnológico e investimento**.



1. Energia

O caderno Energia analisa a transição global para a mobilidade elétrica sob a ótica industrial e de materiais, abordando a evolução dos custos das baterias, avanços tecnológicos, regulações e a geopolítica dos insumos críticos. O estudo explora materiais estratégicos, gargalos produtivos e níveis de maturidade tecnológica, além de avaliar o posicionamento do Brasil, destacando oportunidades e lacunas. Por fim, propõe um roadmap para 2026 - 2035 com diretrizes para inserção do país em etapas de maior valor agregado na cadeia da eletromobilidade.

Viabilizando a transição para a eletromobilidade por meio de materiais, tecnologia e estratégia industrial.



2. Ligas Metálicas

O caderno Ligas Metálicas apresenta tendências tecnológicas e industriais aplicadas ao setor automotivo, considerando diferentes horizontes de inovação. Destaca o papel estratégico dessas ligas em desempenho e eficiência, bem como avanços em processos produtivos e manufaturas inovadoras. Também aborda a relação entre composição, processamento e propriedades, além do uso de inteligência artificial na análise tecnológica. O material consolida essas informações para apoiar decisões estratégicas e soluções sustentáveis na mobilidade.

Reinventando materiais para desempenho, eficiência e sustentabilidade na mobilidade do futuro.





3. Polímeros

O caderno Polímeros traz uma análise estratégica sobre o uso desses materiais no setor automotivo, abordando tendências globais, desafios nacionais e oportunidades de desenvolvimento. Apresenta o contexto internacional e brasileiro, incluindo aspectos de competitividade, inovação e infraestrutura. Organiza as tendências em horizontes de curto, médio e longo prazo, com recomendações voltadas à sustentabilidade e ao fortalecimento da cadeia produtiva.

Impulsionando leveza, inovação e circularidade na engenharia de materiais automotivos.



4. Minerais

O caderno Minerais explora o papel dos minerais críticos na transformação da indústria automotiva, com foco na transição energética e tecnologias de baixo carbono. Analisa o cenário global, o posicionamento do Brasil e os desafios tecnológicos, econômicos e geopolíticos da cadeia de valor. Também apresenta tendências em diferentes níveis de maturidade e identifica oportunidades para agregação de valor, competitividade e sustentabilidade.

Garantindo a base material crítica para a transição energética e tecnológica global.



5. Neomineração

O caderno Neomineração apresenta uma visão integrada da evolução do setor mineral, combinando práticas tradicionais e abordagens inovadoras voltadas à sustentabilidade e à circularidade. Aborda operações, tratamento de minérios, gestão de resíduos e impactos socioambientais, além de destacar oportunidades ligadas à transição energética. O estudo também explora tendências emergentes, como nanotecnologia e novos materiais, apontando caminhos para inovação na cadeia mineral.

Transformando a mineração com inovação, circularidade e novas rotas de valor.

Energia



| Sumário

1. Introdução	56
2. Diretrizes Metodológicas	58
3. Tendências Globais da Mobilidade Elétrica	59
4. Materiais Estratégicos para a Transição Automotiva	65
5. Circularidade Mineral Aplicada à Energia para Mobilidade	71
6. Panorama Brasileiro	76
7. Roadmap Estratégico: 2026–2035	78
8. Recomendações Estratégicas	83
9. Conclusões	85
Referências Bibliográficas	86

1. Introdução

A indústria automotiva global atravessa uma reconfiguração estrutural inédita desde a consolidação plena do motor de combustão interna no início do século XX. A transição para veículos eletrificados, impulsionada por uma combinação de pressões regulatórias, avanços tecnológicos e mudanças sistêmicas nas cadeias de suprimentos globais, vem determinando um novo paradigma industrial. Em 2023, as vendas de veículos elétricos ultrapassaram 14 milhões de unidades, representando mais de 18% das vendas globais e crescendo acima de 25% ao ano desde 2020, segundo o Global EV Outlook (IEA, 2024). Esse crescimento altera profundamente a demanda por materiais, semicondutores e rotas de manufatura, ao mesmo tempo em que redesenha a geopolítica industrial relacionada à energia, mobilidade e segurança da cadeia de suprimentos.

Ressalta-se que a queda sustentada nos custos das baterias é um dos elementos centrais desta transformação, pois o preço médio caiu de cerca de US\$ 1.200/kWh em 2010 para US\$ 139/kWh em 2023, conforme dados da BloombergNEF. Isto reflete os ganhos de escala, melhorias nos processos de refino de lítio e o avanço simultâneo em tecnologias voltadas aos catodos, anodos, eletrólitos e aos sistemas de gerenciamento térmico (BNEF, 2023; IEA, 2023). Esse declínio de preço, impulsionado pela expansão das giga fábricas chinesas, europeias e norte-americanas, permitiu que os veículos elétricos se aproximassem, em algumas aplicações, da paridade de custo com os veículos a combustão em mercados maduros — sobretudo quando considerados custos totais de propriedade e incentivos fiscais associados.

Entretanto, a transição não se dá apenas por eficiência tecnológica. É acompanhada por mudanças no ambiente regulatório e na competição entre blocos econômicos. O Inflation Reduction Act (IRA) nos Estados Unidos redefine os incentivos para produção doméstica de baterias e materiais críticos, condicionando crédito fiscal a níveis crescentes de conteúdo local e excluindo fornecedores de “entidades estrangeiras de preocupação”, o que inclui cadeias dominadas pela China (DOE, 2024; THE WHITE HOUSE, 2022). A União Europeia segue caminho semelhante com o Battery Regulation 2023, definindo requisitos obrigatórios de rastreabilidade, conteúdo reciclado mínimo, pegada de carbono em escopo 1, 2 e 3, além de metas de sustentabilidade que tornam a cadeia de suprimentos muito mais transparente e controlada (UNIÃO EUROPEIA, 2023).

Ainda deve-se considerar, neste contexto, a geopolítica dos materiais críticos. O Critical Minerals Market Review da IEA mostra que mais de 80% do refino global de grafite — insumo essencial para anodos — ocorre na China, assim como 65% de todo o refino global de lítio e mais de 70% da manufatura mundial de células (IEA, 2023). Essa hiperconcentração na China aumenta o risco de interrupções no fornecimento e torna urgente para países industrializados a construção de cadeias alternativas e o fortalecimento de capacidades locais. Na mesma direção, a União Europeia reconhece 34 matérias-primas como críticas para a transição energética, incluindo lítio, grafite, terras raras e manganês de alta pureza (UNIÃO EUROPEIA, 2023).

Neste panorama, o Brasil possui um conjunto promissor de vantagens em relação ao cenário global. O país dispõe de reservas de lítio, especialmente no Vale do Jequitinhonha, que já está integrado em cadeias internacionais via empresas como a Sigma Lithium (SIGMA LITHIUM, 2024). Possui matriz elétrica renovável superior a 80%, fundamental para a competitividade de materiais eletrointensivos como alumínio, grafite sintético e hidróxidos catódicos. Conta com empresas fabricantes de motores elétricos e inversores — com destaque para WEG — e também de baterias, como a Moura e BorgWarner, o que indica potencial de crescimento industrial (MOURA, 2023; WEG, 2024).

Ainda assim, o país possui gargalos, pois não há produção nacional de separadores PP/PE (Polipropileno/Polietileno), eletrólitos LiPF_6 , grafite sintético de classe automotiva, magnetos NdFeB para motores PMSM, substratos cerâmicos avançados (AlN e Si_3N_4) para semicondutores de potência, nem cadeias consolidadas para reciclagem hidrometalúrgica de baterias. Esses gargalos colocam o Brasil em posição vulnerável ao depender integralmente de importações de insumos críticos produzidos majoritariamente em um único país.

Diante desse cenário, este texto estabelece a discussão de tendências que possam trazer insumos e orientar as políticas industriais, as decisões de fomento, as agendas de P&D e o direcionamento estratégico do segmento automotivo brasileiro, com o objetivo de oferecer um mapa direto e técnico sobre onde o Brasil deveria concentrar esforços entre 2026 e 2035.

2. Diretrizes Metodológicas

A elaboração deste texto, metodologicamente, combinou a análise internacional, a avaliação das capacidades nacionais e a seleção de materiais e tecnologias de acordo com os critérios de maturidade, risco e oportunidade estratégica. Essa abordagem permitiu a construção de uma visão integrada para a orientação de decisões de curto, médio e longo prazo.

O primeiro eixo metodológico consistiu na análise de relatórios estruturantes como o Global EV Outlook e o Critical Minerals Market Review da IEA, que fornecem dados sobre custos, curvas de aprendizado, riscos globais de suprimento e projeções de adoção tecnológica (IEA, 2023; IEA, 2024). Documentos do Departamento de Energia dos Estados Unidos, especialmente o Vehicle Technologies Office Annual Report, foram utilizados para compreender o direcionamento tecnológico norte-americano em semicondutores, química de baterias, motores elétricos e integração veicular (DOE, 2024). Os relatórios da BloombergNEF trazem projeções de preços de baterias e volumes de produção globais (BNEF, 2023). Na União Europeia, o Battery Regulation e o Critical Raw Materials Act fornecem a base para entender os requisitos regulatórios e industriais para o mercado europeu até 2035 (UNIÃO EUROPEIA, 2023).

O segundo eixo avaliou as competências técnico-industriais brasileiras. Foram analisadas, por exemplo, as capacidades da WEG em motores PMSM, inversores e eletrônica industrial; a atuação da CBMM no desenvolvimento de aditivos à base de nióbio para baterias; as rotas industriais da Moura para LFP; e a inserção da Sigma Lithium no upstream do lítio de grau bateria (MOURA, 2023; SIGMA LITHIUM, 2024; WEG, 2024). Além disso, ICTs como UNICAMP, UFMG, IPEN, SENAI-CIMATEC / ISI e USP contribuem de forma relevante com pesquisa aplicada em baterias, metalurgia, cerâmicos avançados e wide-bandgap.

O terceiro eixo tratou da cadeia de valor, tendo como referência o fluxo de (1) extração, (2) refino, (3) síntese, (4) componentes, (5) manufatura, (6) integração e (7) reciclagem. A avaliação destes pontos permite mapear as forças e fraquezas (vulnerabilidades), partindo-se da premissa que maior agregação de valor se dá a partir dos pontos intermediários e não na extração do mineral bruto.

O quarto eixo envolveu a avaliação dos TRLs (Technology Readiness Levels), especialmente para tecnologias emergentes como íons de sódio, NMx, LNMO, estado sólido parcial, SiC/GaN, motores livres de terras raras e rotas avançadas de reciclagem. Foram adotados TRLs referenciados na literatura técnica ou em relatórios oficiais, corroborado pela base industrial (CATL, 2021; HOSHINO et al., 2022).

O quinto eixo considerou o benchmarking internacional de política industrial, avaliando instrumentos de fomento usados por EUA (IRA), União Europeia (Net Zero Industry Act) e China (Made in China 2025), incluindo subsídios, créditos fiscais, exigências regulatórias e apoio direto à construção de capacidade industrial.

3. Tendências Globais da Mobilidade Elétrica

A mobilidade elétrica está consolidando-se como o eixo estruturante da transformação industrial do século XXI. A cada ano, sinais convergentes reforçam que a transição das arquiteturas veiculares à combustão para as eletrificadas tem sido sistêmica, influenciando mercados, cadeias de suprimentos, geopolítica, políticas industriais e padrões de consumo. Em 2023, mais de 14 milhões de veículos elétricos foram vendidos globalmente, representando crescimento de 35% em relação ao ano anterior (IEA, 2024). A aceleração contínua deriva de quatro forças principais: avanços tecnológicos, pressões regulatórias, competição industrial entre blocos econômicos e reordenação global dos materiais críticos.



3.1. A dinâmica de custos: o vetor mais relevante

A queda nos preços das baterias continua sendo o principal motor da transição. Em 2010, o custo médio ultrapassava US\$ 1.200/kWh; em 2023, atingiu US\$ 139/kWh, segundo levantamento da BloombergNEF, marcando uma redução acumulada de quase 90% (BNEF, 2023). Essa queda não depende apenas de volume industrial, mas resulta também de avanços profundos em química, manufatura e processos de refino. O aumento da capacidade global de produção — que cresceu mais de 30 vezes em dez anos — contribuiu para diluir custos fixos e acelerar o aprendizado industrial (IEA, 2023).

Além disso, otimizações nos catodos NMC e LFP, melhorias na síntese de materiais, ganhos de eficiência em linhas de produção e a manufatura de eletrodos de maior densidade contribuíram para a queda de custos. O aumento da padronização dos formatos de células — notadamente o formato prismático, com a química LFP, e as células cilíndricas de alta densidade — também reduziu as complexidades de manufatura e logísticas.

Essa dinâmica faz com que a eletrificação seja não apenas um elemento na agenda ambiental, mas uma tendência industrial. Projeções da BloombergNEF indicam que para alguns casos, em mercados maduros, a paridade de custo entre os veículos elétricos e os modelos equivalentes a combustão será atingida antes de 2027, mesmo sem subsídios governamentais, resultado de eficiências crescentes e integração vertical das cadeias (BNEF, 2023).

3.2. Marco regulatório global: o choque de políticas industriais

A transição automotiva é amplamente influenciada por políticas industriais. Nos Estados Unidos, o Inflation Reduction Act (IRA) estabelece subsídios diretos para veículos elétricos, mas impõe restrições rigorosas sobre a origem dos materiais críticos. Para que um veículo seja elegível ao crédito fiscal de US\$ 7.500, parte substancial de seus componentes deve ser produzida nos EUA ou em países com acordos comerciais específicos (DOE, 2024; THE WHITE HOUSE, 2022). Isso exclui materiais provenientes de “entidades estrangeiras de preocupação”, incluindo a China — o que afeta diretamente o suprimento global de baterias, magnetos e semicondutores.



Na União Europeia, o Battery Regulation (2023) estabelece normas abrangentes que influenciam a cadeia global. Exige-se a rastreabilidade integral dos materiais, limites de pegada de carbono, conteúdo mínimo reciclado (a partir de 2030) e obriga testes padronizados de durabilidade e segurança (UNIÃO EUROPEIA, 2023), que se traduz no chamado Battery Passport. Complementarmente, o Net Zero Industry Act incentiva a construção de capacidade industrial europeia em baterias, hidrogênio, semicondutores e renováveis, definindo metas mínimas de produção interna (UNIÃO EUROPEIA, 2023).

A China, por sua vez, segue estratégia distinta: investe há mais de 15 anos na construção de cadeias completas, do upstream mineral ao downstream de manufatura avançada. Políticas como o Made in China 2025 e o New Energy Vehicle Program financiaram centenas de giga fábricas, que permitiram vantagens competitivas para empresas como CATL e BYD (BYD, 2021; CATL, 2021). A China domina as tecnologias químicas, os processos industriais e refinamentos químicos essenciais — e, sobretudo, detém quase todas as etapas de maior valor agregado.

Essa competição regulatória global cria novos requisitos técnicos e estratégicos para inserção de países como o Brasil na cadeia automotiva.

3.3. A evolução das arquiteturas veiculares

A transição não se limita aos veículos puramente elétricos (BEVs). Em mercados emergentes como o Brasil, modelos híbridos (MHEV e HEV) irão desempenhar papel relevante na redução das emissões de escapamento e de CO₂eq e viabilizar a eletrificação com menor custo inicial de adoção. Em 2023, mais de 30% dos veículos vendidos no Japão eram híbridos não plug-in, enquanto na Europa mais de 25% dos registros em 2022 correspondiam a híbridos leves, conforme dados da IEA e ACEA (IEA, 2024).

Em mercados maduros, os PHEVs ocupam papel intermédio, embora sua participação tenda a diminuir com a expansão da infraestrutura de recarga. Em mercados onde a rede de recarga é insuficiente — Brasil, Índia, Sudeste Asiático — sua penetração será mais notória, com a coexistência de múltiplas arquiteturas até o final da década (DOE, 2024; IEA, 2024). Ao mesmo tempo, a padronização da arquitetura de 800 V em veículos premium e esportivos, iniciada por Tesla, Porsche e Hyundai, estabelece novo patamar para sistemas térmicos, inversores e semicondutores de potência, intensificando a relevância de SiC (KANEKO et al., 2023).

3.4. A evolução química: o novo mapa das baterias

A predominância das químicas LFP e NMC ainda irá permanecer, mas cada uma delas avançará em direções distintas. A química LFP é intrinsecamente mais estável termicamente e livre de níquel e cobalto. Em 2023, ultrapassou 30% do mercado global de baterias, impulsionada pela China e pela crescente adoção em veículos europeus de entrada (IEA, 2023). A LFP destaca-se em ônibus elétricos, utilitários e veículos urbanos — exatamente os segmentos mais relevantes para o Brasil (MOURA, 2023).

A rota NMC 811 continua sendo dominante para veículos premium e long-range. No entanto, enfrenta volatilidade de preço devido ao custo elevado de níquel classe I e à sensibilidade do mercado internacional de cobalto (BNEF, 2023). Tecnologias baseadas em manganês de alta pureza e catodos de alta tensão (4,7 V) prometem densidade energética elevada com menor custo e menor dependência de metais críticos (IEA, 2023). O sódio-íon deve iniciar expansão industrial a partir de 2027–2028, segundo CATL e Farasis, com projeções realistas para mobilidade leve urbana (CATL, 2021).

3.5. Semicondutores de potência e sistemas 800 V

O setor automotivo está no centro da revolução wide-bandgap, tendo destaque para os dispositivos de carbeto de silício (SiC). Os dispositivos de SiC apresentam perdas de comutação até 70% menores do que dispositivos de silício, suportam tensões mais elevadas e permitem maior eficiência dos inversores em veículos de 800 V (DOE, 2024).

A adoção de GaN (nitreto de gálio) se dá nos OBCs (On-Board-Chargers) compactos, conversores CC-CC e sistemas auxiliares de alta frequência (KANEKO et al., 2023). A menor resistência de condução e a operação em frequências altas tornam o GaN ideal para compactação (packaging) e redução de massa. Globalmente, empresas como Wolfspeed, Infineon e ST Microelectronics dominam o mercado de SiC, enquanto Transphorm e Navitas lideram em GaN (DOE, 2024).

3.6. Geopolítica dos materiais críticos

A transição para os veículos elétricos tem dependência com a disponibilidade de minerais estratégicos. Atualmente a China possui:

- 90% do refino global de grafite;
- +60% da capacidade global de refino de lítio;
- Aproximadamente 90% da cadeia de terras raras (mineração → refino → magnetos);
- +70% da manufatura global de células (IEA, 2023; UNIÃO EUROPEIA, 2023).

Pondera-se que essa concentração cria riscos sistêmicos e países como EUA, UE, Japão e Coreia tem implementado políticas para a diversificação tecnológica.

3.7. Convergência das tendências: o novo paradigma industrial

A convergência entre custo, tecnologia, regulação e geopolítica determina a direção da eletromobilidade. A crescente regionalização das cadeias, a disputa estratégica por semicondutores e a pressão para a redução da dependência asiática configuram o novo cenário industrial. Países com recursos naturais abundantes e matriz energética renovável — como o Brasil — possuem janela de oportunidade estratégica para ocupar nichos críticos, a partir do estabelecimento de capacidades industriais nas camadas intermediárias da cadeia, onde já se obtém maior valor agregado.

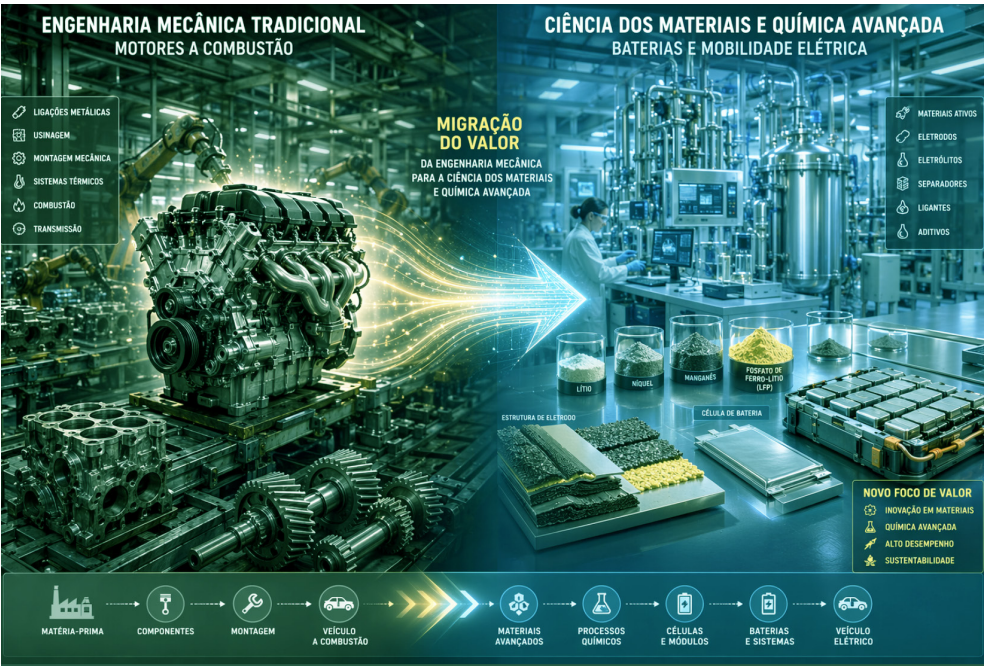


Figura 1 – Representação esquemática da migração do centro de valor na cadeia automotiva: da engenharia mecânica tradicional, baseada em motores a combustão interna e processos de usinagem e montagem, para a ciência dos materiais e química avançada, centrada em materiais ativos, eletrodos e células de bateria para mobilidade elétrica.

Fonte: Elaboração própria com auxílio de inteligência artificial (Microsoft Copilot), 2025.

4. Materiais Estratégicos para a Transição Automotiva

A competitividade automotiva dependerá diretamente da capacidade dos países controlarem os insumos críticos utilizados em baterias, motores elétricos, inversores, PCBs, cabos de alta tensão e sistemas térmicos. Esses materiais — físicos, químicos, magnéticos, semicondutores, poliméricos e estruturais — não são apenas elementos industriais, mas sim, representam vetores estratégicos industriais, pois determinam se um país terá autonomia ou dependerá de cadeias externas em seu processo de transição energética.

4.1. Materiais para Baterias: o núcleo da transformação energética

4.1.1. Catodos – LFP, NMC, NMx, LNMO e químicas emergentes

Os materiais catódicos constituem um elemento chave de uma bateria de íon-lítio. São eles que primariamente determinam a densidade energética, a segurança térmica, custo, vida útil e a viabilidade industrial. A distribuição global da produção catódica é extremamente concentrada, com a China respondendo por mais de 75% da produção mundial de precursores catódicos e materiais ativos (IEA, 2023).

4.1.1.1. LFP – lítio, ferro e fosfato: a química isenta de metais críticos

A química LFP (LiFePO₄) combina baixo custo, estabilidade térmica e ausência dos metais críticos mais sensíveis geopoliticamente — como níquel e cobalto. Por essa razão, a LFP tornou-se dominante em ônibus elétricos, utilitários leves e veículos urbanos, segmentos nos quais segurança e custo superam densidade energética. Segundo a IEA, a LFP respondeu por aproximadamente 30% de toda a produção global de baterias em 2023 (IEA, 2023). A vantagem estratégica para o Brasil é evidente pois o país dispõe de ferro abundante, fosfato e energia elétrica limpa, o que permite competitividade na síntese de precursores catódicos se as rotas industriais forem estabelecidas.

Do ponto de vista industrial, o Brasil já conta com esforços privados e públicos para estruturar cadeias intermediárias de fosfato de lítio e ferro-fosfato. A maior barreira técnica está na padronização de pureza e nos protocolos de síntese úmida, que exigem ambiente controlado, filtração fina e reatores especializados. Países que possuem matriz elétrica barata — como o Brasil — encontram vantagem relativa, porque processos hidrotérmicos dependem intensamente de eletricidade (IEA, 2023; MME, 2020; MOURA, 2023).

4.1.1.2. NMC – níquel, manganês e cobalto: densidade energética e alto risco geopolítico

As químicas NMC (níquel-manganês-cobalto) dominam segmentos premium e veículos de maior autonomia. Em sua formulação mais avançada, a NMC 811, o teor de níquel chega a 80% da fração metálica, enquanto o cobalto permanece abaixo de 10%. O aumento do teor de níquel melhora a densidade energética, mas eleva riscos térmicos e a instabilidade química. A dependência global do níquel classe I – produzido principalmente na Indonésia, Filipinas e Rússia – torna essa rota vulnerável a choques geopolíticos e a variações severas de preço (BNEF, 2023).

O cobalto, por sua vez, é majoritariamente extraído na República Democrática do Congo, considerado pela cadeia global – com ampla documentação – com elevados riscos éticos, trabalhistas e logísticos (IEA, 2023). A produção de precursores NMC é altamente concentrada na China e Coreia do Sul.

Para o Brasil, a química NMC representa uma oportunidade limitada, pois o país não dispõe de níquel classe I em escala competitiva e não possui indústria de refino metalúrgico para os precursores. Entretanto, segmentos de pesquisa em universidades brasileiras tem contribuído para estabelecer rotas experimentais de estabilização da química NMC, o que pode gerar nichos de conhecimento científico e outros alcances (BNEF, 2023; IEA, 2023; UNIÃO EUROPEIA, 2023).

4.1.1.3. NMx – manganês como trade-off da densidade energética e custo

Rotas baseadas em manganês de alta pureza (NMx) tem sido amplamente discutidas como uma alternativa aos altos custos do níquel e cobalto. O manganês apresenta disponibilidade geológica global mais distribuída, menor volatilidade de preço e competitividade técnica crescente. A IEA identifica a química NMx como uma das rotas com melhor relação custo/densidade energética até 2030 (IEA, 2023).

O Brasil possui algumas das maiores reservas de manganês do mundo, além de capacidade metalúrgica instalada. Isso significa que rotas da química NMx representam uma oportunidade concreta de industrialização no médio prazo, tendo as premissas do desenvolvimento da capacidade de purificação (battery grade), que exige processos de lixiviação, precipitação seletiva e controle rigoroso de impurezas (IEA, 2023; MME, 2020).

4.1.1.4. LNMO – alta tensão e ausência de níquel e cobalto

O LNMO ($\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$) opera com tensão nominal de 4,7 V, o que permite densidade energética superior à NMC 622, sem utilizar cobalto e com teor reduzido de níquel. Porém, seu TRL industrial ainda é moderado (nível 4–5), e a estabilidade eletrolítica exige eletrólitos específicos e aditivos estabilizadores (DOE, 2024). Para o Brasil, LNMO é particularmente relevante porque depende de manganês – recurso abundante nacionalmente – e de rotas químicas compatíveis com a base metalúrgica brasileira (DOE, 2024; IEA, 2023).

4.1.2. Anodos – Grafite sintético, grafite natural e Si-C híbrido

Os anodos são dominados por grafite, representando aproximadamente 10–20% do custo total da célula. Globalmente, 90% de todo o grafite sintético é refinado na China (IEA, 2023). A rota de grafitização consome grande quantidade de energia – com temperaturas superiores a 2.500°C – o que reforça a vantagem competitiva de países com energia elétrica barata e limpa.

4.1.2.1. Grafite sintético – o insumo de maior vulnerabilidade global

O grafite sintético oferece desempenho superior ao natural em processos de enchimento e estabilidade eletroquímica, sendo predominante em células automotivas de alta performance. Seu processo envolve:

- Coque de petróleo (ou agulha);
- Mistura e extrusão;
- Moagem de precisão;
- Grafitização em fornos elétricos;
- Esferoidização;
- Recobrimento em alta temperatura.

Cada uma dessas etapas é intensiva em energia e requer controle térmico rigoroso. A concentração asiática decorre de décadas de investimentos em fornos elétricos, padronização

O Brasil, apesar de possuir coque e energia competitiva, não possui localmente a capacidade industrial, sendo, portanto, dependente de importações. A criação de uma planta-piloto nacional pode ser estratégica para reduzir esta vulnerabilidade, especialmente porque o grafite sintético tem tendência de aumento de demanda por baterias de long-range (IEA, 2023; UNIÃO EUROPEIA, 2023).

4.1.2.2. Grafite natural – potencial brasileiro com desafios de pureza

O Brasil tem reservas de grafite natural cristalizado, porém há a exigência de conversão deste recurso em grafite esferoidizado de grau automotivo, com as seguintes etapas típicas:

- Flotação avançada;
- Moagem ultrafina;
- Purificação química (HF-free preferencialmente);
- Recobrimento uniforme;
- Padronização de granulometria.

Atualmente o Brasil não domina estas etapas em escala industrial para baterias. Entretanto, há potencial competitivo de médio prazo, especialmente se integrado a cadeias de reciclagem (IEA, 2023; MME, 2020).

4.1.2.3. Híbridos Si-C – alto potencial, TRL moderado

Materiais híbridos de Si-C buscam elevar a densidade energética dos anodos em 20–40%. No entanto, desafios como expansão volumétrica do silício, degradação da camada SEI e a necessidade de eletrólitos específicos retardam sua adoção. Ainda assim, empresas como a Sila Nanotechnologies e a Panasonic tem avançado nas pesquisas e análises (GOODENOUGH; PARK, 2013). Para o Brasil, o Si-C é uma rota de longo prazo, com aparente participação orgânica restrita a pesquisa e desenvolvimento (DOE, 2024; GOODENOUGH; PARK, 2013).

4.1.3. Separadores – PP/PE: um gargalo relevante

Separadores de polietileno e polipropileno são responsáveis pela segurança interna da célula. Nenhum país latino-americano possui cadeia industrial e para o uso local se demanda a importação da China, Japão, Coreia ou EUA. A construção de uma cadeia nacional exige:

- Extrusão de bicamadas ou trilaminados;
- Tensionamento térmico;
- Estiramento biaxial controlado;
- Tratamento de superfície;
- Controle rigoroso de uniformidade.

O investimento inicial é elevado, mas trata-se de uma das cadeias mais estratégicas para a autonomia industrial brasileira, no escopo dos elementos constituintes da bateria (IEA, 2023; UNIÃO EUROPEIA, 2023).

4.1.4. Eletrólitos – LiPF₆ e solventes carbonatos

O eletrólito é composto principalmente por:

- LiPF₆ (sal condutor);
- Solventes carbonatos (EC – Carbonato de Etileno, DMC – Carbonato de Dimetila, EMC – Carbonato de Etila-Metila);
- Aditivos funcionalizantes.

A cadeia de LiPF₆ é majoritariamente dependente da China. EUA e UE tem tentado reconstruí-la com forte apoio financeiro público, pois o eletrólito é essencial para todas as químicas comerciais (DOE, 2024). O Brasil não possui produção industrial de eletrólitos automotivos – e desenvolver essa rota exige competência química fina, purificação avançada e ambientes classe seca (DOE, 2024; UNIÃO EUROPEIA, 2023).

4.2. Materiais para Motores Elétricos

4.2.1. Terras raras – NdFeB: o grande desafio da eletromobilidade

Motores PMSM dependem de magnetos NdFeB, que exigem:

- Neodímio;
- Praseodímio;
- Ferro;
- Boro;
- e, para aplicações premium, Disprósio.

A China controla aproximadamente 90% da cadeia mundial de terras raras (mineração → separação química → sinterização → magnetos) (IEA, 2023). Sem os magnetos, não é possível controlar a cadeia de motores PMSM. Para o Brasil, há potencial geológico em Araxá e outras regiões, mas falta capacidade de separação, purificação e sinterização — que são as etapas mais críticas (IEA, 2023; UNIÃO EUROPEIA, 2023).

4.2.2. Rota alternativa: motores de relutância e PMSM com menor teor de terras raras

Motores de relutância assistida (IPM-SynRM) tem ganhado penetração por reduzir a dependência dos magnetos. A Tesla já usa versões com menor teor de terras raras, enquanto a Renault e BMW pesquisam motores completamente rare-earth-free (HOSHINO et al., 2022). Essas rotas demandam:

- Controle avançado de magnetização;
- Softwares complexos de controle vetorial;
- Lâminas magnéticas de alta permeabilidade;
- Design eletromagnético sofisticado.

O Brasil possui fabricantes de máquinas elétricas e possui, por conceito, potencial de inserção

4.3. Eletrônica de Potência e Semicondutores

4.3.1. Wide-bandgap – SiC e GaN

A tendência de transição global para sistemas em 800 V torna o SiC indispensável. O DOE aponta que inversores baseados em SiC aumentam a autonomia dos veículos entre 6 e 10% (DOE, 2024), além de reduzirem massa e perdas térmicas. O GaN, por outro lado, é ideal para:

- Conversores de alta frequência;
- Carregadores embarcados compactos (OBCs);
- Aplicações auxiliares.

Empresas líderes incluem Wolfspeed, Infineon, ST, Rohm, Navitas e Transphorm (KANEKO et al., 2023).

O Brasil não possui cadeia industrial e produção de substratos cerâmicos (AlN, Si₃N₄). Essa lacuna impede a competitividade nesta aplicação.

5. Circularidade Mineral Aplicada à Energia para Mobilidade

Além da identificação dos materiais estratégicos associados à eletrificação da mobilidade, torna-se cada vez mais relevante compreender o papel dos materiais secundários gerados pelas cadeias industriais existentes (subprodutos, fluxos laterais e resíduos controlados) como parte efetiva do suprimento de insumos para sistemas energéticos e de mobilidade elétrica.

Essa abordagem amplia a noção de segurança de suprimento, reduz a pegada de carbono associada aos materiais e cria oportunidades concretas de agregação de valor para países que já dispõem de base mineral diversificada e matriz elétrica favorável, como o Brasil. Trata-se menos de abertura de novas frentes produtivas e mais da configuração do uso de fluxos materiais já existentes.

5.1. Circularidade mineral na mobilidade elétrica: dos fluxos industriais locais às cadeias globais

A transição para a mobilidade elétrica redefine a relação entre mineração, energia e indústria automotiva. Para além do acesso a minerais críticos primários, cresce a relevância da chamada segunda fase da cadeia mineral: a geração e valorização de materiais secundários oriundos de processos industriais consolidados. Esses materiais não emergem como resultado de políticas futuras ou de inovação disruptiva ainda incerta, mas como consequência direta da forma como a mineração e a metalurgia já operam. Em cadeias polimetálicas e hidrometalúrgicas complexas, a coprodução de metais e compostos é estrutural, não marginal (USGS).

Nesse contexto, a circularidade mineral aplicada à mobilidade elétrica deve ser compreendida como um processo que parte de fluxos materiais já existentes, que avalia sua compatibilidade técnica com aplicações energéticas. Somente posteriormente discute-se formas de captura de valor e integração industrial.

5.1.1. Casos exemplares de materiais secundários com aplicação direta ou potencial na mobilidade elétrica

5.1.1.1. Níquel polimetálico: cobre e cobalto como subprodutos estratégicos

Cadeias de produção de níquel em ambientes geológicos polimetálicos geram cobre e cobalto como subprodutos naturais do processamento. Após o refino eletrolítico, o cobre atinge níveis de pureza compatíveis com aplicações eletroquímicas avançadas, sendo diretamente aplicável em coletores de corrente anódicos de baterias de íon-lítio para veículos leves e comerciais (INVESTNEWS, 2025).

O cobalto recuperado como subproduto, ainda que em volumes inferiores aos fluxos primários dedicados, constitui uma fonte relevante para químicas catódicas NMC (Níquel, Manganês e Cobalto) e NCA (Níquel, Cobalto e Alumínio) para baterias de íon-lítio, bem como para ligas especiais e aplicações técnicas. A origem como material secundário contribui para a redução da dependência de suprimento proveniente de regiões geopolítica e socialmente sensíveis (INVESTNEWS, 2025). Aqui, a circularidade não decorre da reciclagem ao fim de vida, mas da lógica intrínseca da coprodução metalúrgica.



Figura 2 – Sistema circular integrado de fluxos de materiais na cadeia de baterias e mobilidade elétrica, com o refino e processamento como núcleo estratégico de convergência, recuperação e reinserção de valor ao longo das etapas de mineração, produção, uso, desmontagem e reciclagem.

Fonte: Elaboração própria com auxílio de inteligência artificial (Microsoft Copilot), 2025.

5.1.1.2. Zinco e cobalto secundário: subprodutos do refino hidrometalúrgico

No refino hidrometalúrgico do zinco, por exemplo, etapas de purificação removem impurezas metálicas, gerando subprodutos de elevado valor econômico, entre eles compostos intermediários de cobalto. Esse cobalto secundário já se encontra parcialmente concentrado e separado, configurando um fluxo material com potencial de integração a cadeias energéticas.

Além do cobalto, esses processos também geram cobre, prata, chumbo, ouro e ácido sulfúrico (BRASIL MINERAL, 2025; CORREIO REGIONAL, 2025). Este último desempenha papel crítico como insumo em rotas hidrometalúrgicas de purificação de metais e reciclagem de baterias, evidenciando como materiais secundários “invisíveis” sustentam cadeias emergentes da mobilidade elétrica.

5.1.1.3. Nióbio e fluxos intermediários de alto valor

Embora tradicionalmente associado a aplicações estruturais, o processamento do nióbio gera uma variedade de óxidos, ligas intermediárias e fluxos laterais ricos em elementos como ferro, titânio e manganês. Esses materiais podem ser reengenheirados como aditivos condutivos, estabilizantes estruturais ou modificadores eletroquímicos para aplicações em armazenamento de energia (INVESTNEWS, 2025).

Esse caso ilustra uma forma de circularidade mineral em que intermediários industriais deixam de ser transitórios e passam a ser funcionalizados como produtos finais de maior valor agregado, especialmente em nichos da mobilidade elétrica que demandam desempenho específico mais do que volume (MINÉRIOS & MINERALES, 2024).

5.1.1.4. Alumínio e resíduos do refino da bauxita: lama vermelha

A cadeia do alumínio é particularmente relevante para a mobilidade elétrica, tanto pelo papel do metal em estruturas leves, coletores de corrente anódicos e catódicos de baterias de íon-sódio e em químicas catódicas NCA para baterias de íon-lítio, quanto pela existência de resíduos industriais gerados em larga escala. A lama vermelha resultante do refino da bauxita contém ferro, titânio, sílica e elementos de terras raras em baixas concentrações.

Embora o uso da lama vermelha em sistemas de mobilidade elétrica ainda se encontre em estágio exploratório, trata-se de um rejeito industrialmente estruturado, com controle químico, logístico e ambiental (MINÉRIOS & MINERALES, 2023). Essa condição reduz barreiras para sua eventual valorização como fonte secundária de materiais funcionais, térmicos ou eletromagnéticos.

5.1.1.5. Manganês, grafita e silício: reprocessamento e sinergias industriais

Rejeitos de beneficiamento, frações finas e materiais fora de especificação metalúrgica nas cadeias de manganês, grafita e silício constituem fluxos secundários relevantes (USGS). Por meio de reprocessamento químico e físico, esses materiais podem ser redirecionados para aplicações em cátodos ricos em manganês, grafita esferoidizada e, no médio prazo, ânodos híbridos à base de silício-carbono. A combinação desses reprocessamentos com uma matriz elétrica de baixo carbono reforça a aderência desses materiais às exigências globais de rastreabilidade e redução de emissões associadas à mobilidade elétrica.

5.2. Implicações e considerações da circularidade mineral aplicada à mobilidade elétrica

A análise dos fluxos minerais secundários associados às cadeias brasileiras de mineração e metalurgia indica que a circularidade mineral aplicada à mobilidade elétrica não depende exclusivamente de processos de reciclagem ao fim de vida dos produtos, nem de transformações estruturais ainda incertas. Ao contrário, ela se ancora em materiais que já são gerados de forma sistemática, em escala industrial, como parte inerente de cadeias produtivas consolidadas.

Subprodutos metálicos, fluxos laterais e resíduos industriais controlados, tais como cobre e cobalto coproduzidos em cadeias polimetálicas, compostos secundários do refino de zinco, intermediários do processamento do nióbio, resíduos do refino da bauxita e frações fora de especificação de manganês, grafita e silício, constituem um conjunto de materiais cuja compatibilidade técnica com aplicações energéticas e de mobilidade elétrica é, em muitos casos, já comprovada, e em outros, condicionada a etapas adicionais de qualificação e adequação de processo.

Esses materiais representam uma forma de circularidade que antecede o fim de vida dos produtos finais e que decorre diretamente da organização atual das cadeias industriais, não de políticas futuras ou de rupturas tecnológicas. Nesse sentido, a circularidade mineral deve ser compreendida menos como uma estratégia corretiva e mais como uma oportunidade de reconfiguração funcional do uso de fluxos materiais existentes, especialmente em um cenário global marcado por restrições de suprimento, exigências crescentes de rastreabilidade e pressão por redução de emissões associadas aos materiais.

Para o Brasil, essa leitura desloca o foco da expansão da mineração primária para a valorização inteligente da chamada segunda fase da cadeia mineral, na qual engenharia de processos, purificação, adequação funcional e integração com cadeias globais se tornam centrais. A combinação entre base mineral diversificada, matriz elétrica de baixo carbono e geração estruturada de materiais secundários cria condições reais para a inserção do país em nichos estratégicos da mobilidade elétrica, como baterias, sistemas de propulsão elétrica, eletrônica de potência e componentes associados.

Assim, a circularidade mineral aplicada à energia para mobilidade não deve ser tratada apenas como um objetivo ambiental ou regulatório, mas como um vetor concreto de agregação de valor industrial. Ao reconhecer os materiais secundários já disponíveis como ponto de partida, o país pode avançar na cadeia global da mobilidade elétrica de forma pragmática, incremental e alinhada às demandas internacionais por materiais estratégicos de menor pegada de carbono.

6. Panorama Brasileiro

Em síntese, o Brasil apresenta uma combinação de vantagens e lacunas estruturais, conforme tópicos abaixo:

6.1. Vantagens

O país dispõe de:

- Reservas de lítio (Jequitinhonha);
- Manganês de alta pureza;
- Grafite natural;
- Fosfato e ferro para a química LFP;
- Matriz elétrica limpa;
- Amplo parque industrial instalado.

Além disso, o país tem competências de engenharia consolidadas e um ecossistema de pesquisa e desenvolvimento que se revela pelos centros voltados a materiais, metalurgia, química e energia (EPE, 2023; MOURA, 2023; SIGMA LITHIUM, 2024; WEG, 2024).

6.2. Lacunas críticas

O desafio imposto ao Brasil se dá pela não dominância dos insumos intermediários da cadeia de baterias, inversores ou máquinas elétricas, tais como:

- Separador PP/PE;
- Eletrólito LiPF_6 nacional;
- Grafite sintético automotivo;
- Magneto NdFeB ;
- Substrato cerâmico $\text{AlN/Si}_3\text{N}_4$;
- Cadeia de reciclagem hidrometalúrgica em escala (roadmap de investimento sinalizado pela Tupy);
- Wide-bandgap;
- Planta-piloto de precursores catódicos de alto valor

A ausência destes insumos posiciona o Brasil como consumidor final e não como produtor

6.3. Sugestão de ações de curto, médio e longo prazo

- **Curto prazo (2024–2028):**

- Consolidação da química LFP;
- Expansão do upstream do lítio;
- Fortalecimento de motores e inversores nacionais;
- Início da planta-piloto de grafite sintético.

- **Médio prazo (2028–2032):**

- Rotas NMx e LNMO;
- Eletrólitos semi-sólidos;
- Reciclagem hidrometalúrgica industrial;
- Desenvolvimento experimental do SiC nacional.

- **Longo prazo (2032–2035+):**

- Magnetos NdFeB;
- Cerâmicos automotivos;
- Rota Si-C híbrido;
- Estado sólido parcial.

7. Roadmap Estratégico: 2026–2035

O período entre 2026 e 2035 tem caráter decisivo na consolidação de um papel protagonista na cadeia global da eletromobilidade, pois determina a atuação de um país como importador ou produtor de insumos críticos. **Neste sentido, propõe-se de forma não exaustiva um roadmap que integra, para o caso brasileiro,** as tendências tecnológicas globais, as capacidades nacionais e as políticas industriais de referência. O roadmap contribui para o estabelecimento de prioridades, a identificação de janelas de oportunidade e os TRLs, a magnitude dos investimentos necessários e as políticas públicas estratégicas. Baseado nas

- (2026–2028): Construção de Fundamentos
- (2028–2032): Escalonamento Industrial e Substituição Competitiva
- (2032–2035): Liderança Regional e Consolidação Tecnológica

O encadeamento temporal reflete a dinâmica de maturação tecnológica observada em cadeias globais (IEA, 2023; DOE, 2024).

7.1 (2026–2028) – Construção dos Fundamentos Industriais

Esta onda concentra as ações de curto prazo, levando-se em conta as capacidades já existentes e as condições de contorno regulatórias externas. O objetivo é estabelecer as bases industriais críticas que permitam ao Brasil ingressar nas camadas intermediárias da cadeia de valor.

7.1.1. Consolidação da cadeia LFP nacional

A LFP é a química mais alinhada à matriz industrial brasileira e aos segmentos prioritários da transição nacional. O Brasil já possui competências industriais relevantes que são a base para esta química, considerada estratégica para os ônibus, veículos comerciais leves e utilitários. Pata tal, faz-se necessário:

- Estruturação de plantas-piloto para precursores catódicos (LFP e LMFP);
- Criação de ambiente regulatório estável para verticalização de lítio (redução de volatilidade exportadora);
- Estímulo para alianças entre universidades, empresas e operadores logísticos.

7.1.2. Planta-piloto nacional de grafite sintético

A China detém a cadeia de grafitação automotiva, e, ao estabelecer uma planta-piloto, o Brasil reduz a vulnerabilidade neste insumo crítico para a cadeia de baterias. Por já ter coque e energia competitiva, o Brasil tem o potencial de reduzir custos do processos (IEA, 2023; MME, 2020).

7.1.3. Início da cadeia de reciclagem hidrometalúrgica

O Battery Regulation da UE tornará obrigatória a presença de materiais reciclados em baterias vendidas no continente a partir de 2030 (UNIÃO EUROPEIA, 2023). Países que desenvolverem capacidade antecipada terão vantagens exportadoras significativas. Sendo o maior mercado automotivo do hemisfério sul, o Brasil poderá estruturar:

- A rastreabilidade das baterias;
- A modelagem econômica de logística reversa;
- Uma planta-piloto com capacidade de recuperar lítio, níquel, manganês e grafite.

Essa infraestrutura reduz dependência de importações e cria economia circular de alto valor (IEA, 2023).

7.1.4. Fortalecimento da indústria nacional de motores elétricos e inversores

Deve-se citar que a WEG é uma das poucas empresas não asiáticas que tem atuação global em máquinas elétricas (WEG, 2024). Assim, o Brasil poderá:

- Estimular a produção de motores PMSM automotivos;
- Fomentar rotas de motores rare-earth-free;
- Estimular e consolidar a produção de inversores automotivos de alto desempenho.

Esses movimentos criam sinergia entre mobilidade, ciclos industriais e infraestrutura.

7.1.5. Primeiras iniciativas em eletrônica de potência SiC

Embora o Brasil ainda não produza o wide-bandgap, é possível iniciar com ações de:

- Encapsulamento local;
- Testes de qualificação automotiva;
- Consórcios com players asiáticos e europeus.

Assim, pode-se adquirir as competências técnicas necessárias de forma prévia ao planejamento de uma eventual produção plena.

7.2. (2028–2032) – Escalonamento e Substituição Competitiva

Nesta onda, propõe-se migrar das iniciativas de planta-piloto para um ambiente em que a capacidade industrial seja escalável, a fim de reduzir as dependências e criar produtos exportáveis.

7.2.1. Rotas NMx e LNMO com base em manganês nacional

O manganês brasileiro permite a produção de catodos com menor custo e intensidade de recursos. Desta forma, investimentos nestas rotas permitem:

- Reduzir a dependência de níquel/cobalto;
- Elevar a densidade energética;
- Gerar propriedade intelectual própria.

Estudos internacionais mostram que NMx pode atingir custos inferiores a 60% dos equivalentes NMC até 2030 (IEA, 2023).

7.2.2. Produção nacional de eletrólitos automotivos

Propõe-se que o Brasil deveria desenvolver:

- LiPF₆ nacional;
- Solventes carbonatos de alta pureza.

Se tratando de um insumo comum para todas as químicas atuais, obtém-se diretamente

7.2.4. Reciclagem hidrometalúrgica em escala industrial

A etapa da planta-piloto evolui para a operação industrial, a fim de garantir:

- Recuperação de >95% de lítio;
- Recuperação seletiva de Mn, Ni e grafite;
- Rastreabilidade integrada com montadoras e outros stakeholders da cadeia.

7.3. (2032–2035) – Consolidação Tecnológica

7.3.1. Magnetos NdFeB nacionais

A produção de magnetos automotivos confere autonomia na cadeia de motores elétricos. A China possui vantagem competitiva, mas a UE e EUA já estruturam políticas de substituição (UNIÃO EUROPEIA, 2023). O Brasil deveria integrar-se nesse movimento.

7.3.2. Magnetos NdFeB nacionais

São essenciais para inversores com SiC e GaN (KANEKO et al., 2023). A produção nacional permitiria:

- Verticalizar a eletrônica automotiva;
- Criar um ecossistema de semicondutores;
- Reduzir a dependência de importações sofisticadas. .

7.3.3. Estado sólido parcial

Brasil poderia participar em:

- Eletrólitos poliméricos;
- Deposição sólida híbrida;
- Aditivos de interface.

7.3.4. Motores rare-earth-free de alta performance

O país poderia tornar-se referência na América Latina em rotas de SynRM automotivos (WEG, 2024).

8. Recomendações Estratégicas

As recomendações foram organizadas em 12 eixos estruturantes, com ênfase em política industrial, governança, incentivos e prioridades tecnológicas, vide Tabela 1:

Tabela 1 – Recomendações Estratégicas composta em 12 eixos.

Estratégia Nacional de Inovação em Materiais para a Indústria Automotiva				
Eixo	Descrição	Órgãos e Entidades Envolvidas	Prioridades / Ações Principais	
7.1	Programa Nacional de Materiais Críticos Automotivos	Estruturar programa transversal inspirado no IRA (EUA) e CRMA (UE) para coordenação nacional da cadeia de materiais críticos	MME; MDIC; ANEEL; ABDI; BNDES; FINEP; AEA	Priorizar desenvolvimento de: grafite sintético, LFP/LMFP, separadores PP/PE, LiPF ₆ , magnetos NdFeB, substratos cerâmicos (AlN/Si ₃ N ₄)
7.2	Centros de Competência Integrados com a Indústria	Criar centros nacionais com modelo semelhante ao KETI (Coreia), CALB (China) e Batteries Europe (UE)	AEA; ICTs; universidades; indústria automotiva	1) Centro de Materiais Catódicos (LFP/NMx) 2) Centro de Grafite & Anodos Avançados 3) Centro de Semicondutores Automotivos (SiC/GaN)
7.3	Planta-Piloto de Grafite Sintético	Criar planta-piloto nacional para reduzir dependência crítica do grafite sintético importado	MDIC; BNDES; setor privado, ICTs	Desenvolvimento nacional do processo de grafitação e coating; domínio de rotas industriais automotivas
7.4	Inserção Internacional Ativa em Cadeias de Baterias	Integrar o Brasil a cadeias globais por meio de acordos e cooperação técnica	MDIC; BNDES; Itamaray; OEMs globais; ICTS	Estabelecer MoUs com OEMs; acordos de pesquisa com Coreia/Japão/UE; colaboração em reciclagem

7.5	Atração de Gigafábricas com Conteúdo Local	Criar política de atração baseada em contrapartidas industriais	MDIC; BNDES; governos estaduais	Exigir conteúdo local progressivo; treinamento técnico; transferência tecnológica parcial
7.6	Estímulo a Motores Automotivos Nacionais	Consolidar produção nacional de motores elétricos automotivos	Setor privado, ICTs	Desenvolver rotas PMSM e SynRM; integração com setor automotivo
7.7	Incentivo à Cadeia Nacional de Eletrólitos	Estruturar apoio financeiro à produção nacional de eletrólitos automotivos	Estruturar apoio financeiro à produção nacional de eletrólitos automotivos	Apoiar produção de LiPF ₆ , solventes carbonatos, aditivos para eletrólitos
7.8	Formação Especializada	Desenvolver capital humano técnico e científico para a cadeia de materiais críticos	MEC; CAPES; SENAI; Universidade	Criar mestrado profissional em Materiais Automotivos; cursos técnicos em síntese e purificação
7.9	Marco Regulatório de Reciclagem Automotiva	Estabelecer arcabouço normativo alinhado à UE para reciclagem de baterias	MME; MMA; MDIC; AEA; ANFAVEA; Recicladoras	Criar regulamentação inspirada na UE para rastreabilidade e conteúdo reciclado

7.10	Mapa Nacional de Capacidades	Mapear capacidades industriais, tecnológicas e científicas para orientar políticas de fomento	AEA; MDIC; ABDI; FINEP; universidades	Criar inventário nacional de competências, laboratórios, empresas e demandas
------	------------------------------	---	---------------------------------------	--

9. Conclusões

A transição automotiva global se pautará pela competição das cadeias de materiais críticos que redefinirá, até 2035, quem terá o papel de produtor estratégico ou dependente de importações. De fato, o Brasil possui vantagens estruturais relevantes — matriz elétrica limpa, reservas minerais e base industrial instalada — mas possui desafios na capacidade produtiva em etapas intermediárias da cadeia, que são justamente as etapas de maior valor agregado.

O conjunto de tendências indica que o domínio das tecnologias relacionadas a baterias (LFP, NMx, LNMO, eletrólitos, separadores e grafite sintético), aos semicondutores automotivos (SiC/GaN) e aos motores elétricos (PMSM e SynRM) deve guiar o posicionamento estratégico brasileiro. A convergência entre novas regulações internacionais, competição geopolítica e a forte regionalização das cadeias produtivas exige ação céleres e coordenadas.

Para que o país se torne um produtor competitivo, recomenda-se a implementação de um Programa Nacional de Materiais Críticos Automotivos, a criação de centros de competência integrados à indústria, o desenvolvimento de plantas-piloto em áreas sensíveis (como grafite sintético e reciclagem hidrometalúrgica) e políticas de atração de giga fábricas com contrapartidas industriais claras. Adicionalmente, o fortalecimento de motores elétricos nacionais, eletrólitos automotivos e substratos cerâmicos permitirá ao Brasil ocupar nichos estratégicos de médio e longo prazo.

O êxito das ações propostas dependerá da articulação entre governo, indústria, ICTs e agências de fomento, garantindo continuidade, governança e visão de longo prazo. Se implementado, o conjunto de ações poderá posicionar o Brasil como ator relevante na mobilidade elétrica global, transformando recursos naturais em capacidades industriais, tecnológicas e estratégicas — e assegurando autonomia nacional em um dos setores mais críticos da transição energética do século XXI.

Referências Bibliográficas

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE (BNEF). Lithium-ion battery pack prices hit record low of \$139/kWh. 2023. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>. Acesso em: 9 jun. 2026.

BRASIL MINERAL. As maiores empresas do setor mineral 2025. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/asmaiores>. Acesso em: 14 abr. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Sumário mineral brasileiro 2020. Brasília: MME, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2020>. Acesso em: 9 jun. 2026.

BYD COMPANY LIMITED. 2020 Corporate Social Responsibility Report. Shenzhen, 2021. Disponível em: <https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2021/0329/2021032901752.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2026.

CBMM inaugura planta de óxido de níobio e mira aplicações em baterias e nanomateriais. Minérios & Minerales, 2024. Disponível em: <https://revistamineros.com.br/cbmm-inaugura-planta-de-oxido-de-niobio-e-mira-aplicacoes-em-baterias-e-nanomateriais/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

CBMM, da família Moreira Salles, investirá R\$ 10 bilhões em nova aposta no níobio. InvestNews, 2025. Disponível em: <https://investnews.com.br/negocios/cbmm-11-bilhoes-investimento/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

CONTEMPORARY AMPEREX TECHNOLOGY CO. LIMITED (CATL). Sodium-ion battery white paper. Ningde, 2021. Disponível em: <https://www.catl.com/en/technologybrand/831.html>. Acesso em: 9 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2033. Brasília: EPE/MME, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>. Acesso em: 9 jun. 2026.

GOODENOUGH, J. B.; PARK, K. S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective. Journal of the American Chemical Society, Washington, v. 135, n. 4, p. 1167-1176, 2013.

HOSHINO, Y. et al. Rare-earth-free motors: advances and challenges. Japão, 2022

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Critical minerals market review 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>. Acesso em: 9 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV Outlook 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 9 jun. 2026.

INVESTNEWS. Vale e Glencore assinam acordo para avaliar novo projeto de cobre no Canadá. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://investnews.com.br/negocios/vale-glencore-parceria-projeto-canada/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

KANEKO, D. et al. Wide bandgap power devices for e-mobility. IEEE, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10052586>. Acesso em: 9 jun. 2026.

MOURA. Apresentação Workshop BNDES. 2023. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/10/adalberto.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2026.

NEXA resources reporta sólidos resultados com lucro líquido de US\$ 100 milhões no 3T25. Correio Regional, 2025. Disponível em: <https://correioregional.net/2025/10/31/nexa-resources-reporta-solidos-resultados-com-lucro-liquido-de-us100-milhoes-no-3t25/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

Nova planta de filtragem integra projeto da Alcoa para criar “refinaria do futuro”. Minérios & Minerales, 2023. Disponível em: <https://revistamineros.com/nova-planta-de-filtragem-integra-projeto-da-alcoa-para-criar-refinaria-do-futuro/>. Acesso em: 14 abr. 2026.

SIGMA LITHIUM CORPORATION. Sigma Lithium to release full year 2023 results April 1, 2024; files updated NI 43-101 technical report with mineral resource estimates. Vancouver, 2024. Disponível em: <https://sigmalithiumcorp.com/sigma-lithium-to-release-full-year-2023-results-april-1-2024-files-updated-ni-43-101-technical-report-with-mineral-resource-estimates/>. Acesso em: 9 jun. 2026.

THE WHITE HOUSE. Building a clean energy economy: a guidebook to the Inflation Reduction Act’s investments in clean energy and climate action. Washington, DC, 15 dez. 2022. Disponível em: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2026.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. 2023 VTO annual merit review results report: vehicle technologies office. Washington, DC, maio 2024. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/2023_Vehicle_Technologies_Office_Annual_Merit_Review_Results_Report.pdf. Acesso em: 9 jun. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2023/1542 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de julho de 2023. Relativo às baterias e respetivos resíduos, que altera a Diretiva 2008/98/CE e o Regulamento (UE) 2019/1020 e revoga a Diretiva 2006/66/CE. Jornal Oficial da União Europeia, L 191, 28 jul. 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj?locale=pt>. Acesso em: 9 jun. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Study on the critical raw materials for the EU 2023: final report. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2023. Disponível em: <https://www.greenpolicyplatform.org/sites/default/files/downloads/resource/study%20on%20the%20critical%20raw%20materials%20for%20the%20eu%202023-ET0723116ENN.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2026.

WEG S.A. Relatório anual integrado 2023. Jaraguá do Sul, 2024. Disponível em: <https://ri.weg.net/informacoes-financeiras/relatorios-anuais/>. Acesso em: 9 jun. 2026.

LIGAS METÁLICAS

| Sumário

1. Introdução	56
2. Visão geral global – Contextualização	58
3. Regulamentações nacionais e internacionais e o impacto na evolução das ligas metálicas	59
4. A infraestrutura brasileira frente a necessidade de novos desenvolvimento e fornecimento de ligas metálicas	71
5. A busca por ligas mais leves e resistentes: o que está mudando na prática	78
6. Alumínio estrutural e para gestão térmica	83
7. Síntese do trabalho	85
Referências Bibliográficas	86

1. Introdução

Este caderno de tendências reúne uma visão estruturada de curto, médio e longo prazo, sobre a evolução das ligas metálicas e dos processos metalúrgicos aplicados ao setor automotivo, em geral para veículos leves. Elaborado pelo Instituto SENAI de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais (ISIMLE), o material parte do entendimento de que a competitividade das montadoras e de sua cadeia de fornecimento passa, cada vez mais, por decisões de engenharia de materiais: quais ligas empregar, como processá-las, como uni-las, como protegê-las contra degradação e como garantir desempenho ao longo do ciclo de vida do veículo.

A transformação do setor é impulsionada por mudanças simultâneas em produto e em modelo de negócio: eletrificação, digitalização, novos padrões de segurança, exigências mais rígidas de eficiência energética e a necessidade de aumentar a confiabilidade em condições severas de uso. Nesse contexto, os metais continuam sendo a espinha dorsal da mobilidade, seja em carroceria, chassi, powertrain, sistemas térmicos, componentes elétricos e eletrônicos, ou na arquitetura estrutural e de proteção dos sistemas de baterias. Porém, a simples adoção de materiais tradicionais já não é suficiente. A agenda atual exige novos desenvolvimentos de ligas e, com igual importância, novas rotas de processamento e manufatura, capazes de entregar combinações mais difíceis de atingir: alta resistência com boa conformabilidade, menor massa com maior rigidez, resistência à corrosão com compatibilidade eletroquímica, desempenho térmico com estabilidade microestrutural, e durabilidade com reciclabilidade.

Por isso, este caderno trata tendência como mais do que a escolha de um material. Tendência é também como esse material é produzido e aplicado. Avanços em rotas como fundição sob pressão, extrusão, laminação e tratamentos térmicos, manufatura aditiva, conformação a quente, processos híbridos e técnicas modernas de união (incluindo abordagens para materiais dissimilares) têm papel decisivo para viabilizar ligas mais leves e mais resistentes em escala industrial, com repetibilidade e custo total competitivo. Em muitos casos, o gargalo não é apenas a composição química, mas o controle de microestrutura, defeitos, tensões residuais, superfície e interface, aspectos que determinam o desempenho real do componente em serviço.

O levantamento que fundamenta este landscape tecnológico foi construído a partir da consolidação e análise sistemática de dados extraídos de bases internacionais de relatórios, além de artigos científicos e documentos de patentes. O mapeamento de patentes foi realizado utilizando a base Derwent Innovations Index, que reúne resumos e referências de um amplo conjunto de famílias de patentes, além de recursos de rastreabilidade tecnológica, como vínculos com documentos citados, citações recebidas e conexões com literatura correlata. Para a prospecção de artigos científicos, foi utilizada a plataforma Web of Science™, que permite pesquisa bibliométrica e análise de tendências com base em um grande volume de registros e referências citadas em diferentes áreas do conhecimento. A organização das informações em horizontes de inovação de curto, médio e longo prazo, permitiu interpretar o grau de maturidade das soluções identificadas e oferecer subsídios estruturados para orientar decisões estratégicas no contexto de ligas metálicas e metalurgia aplicada à mobilidade automotiva.

2. Visão geral global – Contextualização

2.1. Panorama mundial estratégico de ligas metálicas para a indústria automotiva

A indústria automotiva global está no centro de uma reconfiguração tecnológica e geopolítica marcada por três forças simultâneas: (i) a transição para mobilidade elétrica e conectada, (ii) a pressão por redução de emissões no ciclo de vida (ESG e regulamentações), e (iii) a competição por cadeias de suprimentos de metais e elementos de liga considerados críticos. Nesse cenário, ligas metálicas deixam de ser apenas “matéria-prima” e passam a ser um ativo estratégico, tanto do ponto de vista de desempenho (segurança, durabilidade, eficiência) quanto de sustentabilidade e custo total de propriedade. A eletrificação, em particular, acelera a demanda por materiais com funções além da mecânica, como condutividade elétrica/térmica, blindagem eletromagnética, resistência ao fogo e integração térmica, e aumenta a importância de decisões de engenharia guiadas por análise de ciclo de vida e por risco de suprimento (IEA, 2024).

2.2. Por que “novos desenvolvimentos” em ligas importam para ESG

No ESG, as ligas metálicas têm um papel duplo: são parte do problema (processos intensivos em energia e CO₂, mineração, refino) e parte essencial da solução (redução de massa, maior eficiência energética, extensões de vida útil, reparabilidade e alta reciclabilidade). O ponto-chave é que a avaliação se deslocou do “desempenho em serviço” para “desempenho no ciclo de vida”: a liga que melhor atende ESG não é necessariamente a mais leve, mas a que minimiza emissões considerando produção, uso e fim de vida, e que mantém robustez e segurança. Uma síntese crítica de estudos de LCA (Life Cycle Assessment) para materiais leves em BIW e chassis mostra que os benefícios ambientais dependem fortemente de hipóteses de uso (quilometragem, mix elétrico/combustível), taxas de reciclagem, conteúdo reciclado e reduções secundárias de massa, e evidencia que A/HSS e alumínio frequentemente competem em faixas próximas dependendo do cenário (GONÇALVES et al., 2022).

Além disso, desenvolver novas ligas, hoje significa também desenvolver rotas de baixo carbono: maior uso de sucata, controle de impurezas, compatibilidade com reciclagem em loop fechado, e redução de elementos críticos/escassos. Para alumínio, por exemplo, a alavanca ESG mais direta é aumentar o conteúdo reciclado (secundário), pois a reciclagem demanda muito menos energia do que a produção primária. Estimativas amplamente divulgadas apontam economias na ordem de 95% de energia (e grande redução associada de GEE) quando se compara produção primária com reciclagem (na fronteira “cradle-to-gate” vs “gate-to-gate”, dependendo da metodologia) (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, [s.d.]; REUTERS, 2024).

2.3. Mobilidade elétrica: novos requisitos e novas pressões por materiais

A mobilidade elétrica intensifica a demanda por baterias e pela infraestrutura de materiais associada e isso amplia novos requisitos para ligas metálicas. Relatórios recentes mostram crescimento acelerado de demanda de baterias e de eletrificação, o que aumenta a relevância de cobre (condutividade), alumínio (carcaças e estruturas, dissipação térmica, extrudados), aços de alta resistência (crash e custo), e também de materiais que suportem temperaturas/ambientes severos em powertrains e sistemas térmicos. Em 2023, a demanda por baterias para EVs atingiu centenas de GWh e segue em trajetória de múltiplos até 2030–2035 em diferentes cenários, reforçando que o “carro do futuro” é mais intensivo em metais e em engenharia de interfaces (uniões, corrosão galvânica, fadiga térmica, integridade estrutural do pack) (IEA, 2024a; IEA, 2024b).

Um aspecto estratégico muitas vezes subestimado é que, nos EVs, redução de massa continua sendo uma moeda forte, mas por uma razão adicional: cada kg economizado pode ser convertido em autonomia extra, ou em bateria menor (reduzindo custo, CO₂ e pressão de suprimento). Por isso, lightweighting permanece como estratégia de eficiência (antes para consumo; agora também para alcance e dimensionamento de bateria). A literatura técnico-industrial destaca que a redução de massa é uma das formas mais diretas de reduzir energia de uso e/ou permitir baterias menores, e que a cesta de materiais leves (aços avançados, alumínio, magnésio, polímeros e compósitos) tende a coexistir, pois cada família resolve um conjunto diferente de restrições de processo e custo (DOE, 2015; ICCT, 2016).

A esse pano de fundo tecnológico se soma um “aperto” regulatório no mundo todo que muda, na prática, o que é um veículo competitivo. As regras atuais não olham só para o motor: elas combinam metas de CO₂ (dióxido de carbono) em média de frota, limites de poluentes como NOx (óxidos de nitrogênio), PM (material particulado) e PN (número de partículas), exigências de emissões em condições reais de uso (RDE – Real Driving Emissions, isto é, “emissões em condução real”) e, cada vez mais, itens antes vistos como “secundários”, como partículas de freio e durabilidade de componentes. Esse conjunto de exigências pressiona as montadoras a buscar ganhos simultâneos em massa, eficiência energética, durabilidade e reciclabilidade, porque tudo isso vira custo de conformidade, risco de multa e até risco de mercado (EUROPEAN COMMISSION, [s.d.]; UNIÃO EUROPEIA, 2024).

3. Regulamentações nacionais e internacionais e o impacto na evolução das ligas metálicas

3.1. Europa: Regulamento (UE) 2019/631 e EURO 7

Na União Europeia, a estratégia de materiais é muito influenciada por duas frentes. A primeira são as metas de CO₂ para carros e vans, estabelecidas no arcabouço do Regulamento (UE) 2019/631. Em termos simples: a média de CO₂ da frota de cada fabricante precisa cair em “degraus” ao longo do tempo. As regras pedem redução de 15% no período 2025–2029 (comparado à base de 2021), depois 55% para carros e 50% para vans em 2030–2034, e 100% a partir de 1º de janeiro de 2035 para novos carros e vans (na prática, “zero CO₂ no escapamento” como meta regulatória para a venda de novos veículos). Isso empurra a engenharia para soluções que entreguem segurança e rigidez com menos massa (por exemplo, aços avançados bem aplicados e alumínio em partes onde a troca “fecha a conta”), sem explodir custo e sem piorar a reciclabilidade (DORNOFF et al., 2025).

A segunda frente europeia é o Euro 7, que amplia o foco: não é só “emissão do escapamento”, mas sim o veículo como um sistema de emissões e durabilidade. O Euro 7 vale para veículos leves (categorias M1 = carros de passeio e N1 = comerciais leves) e traz regras técnicas e de certificação, incluindo pontos como requisitos de durabilidade e itens ligados a emissões não provenientes do escapamento (por exemplo, partículas relacionadas a freios) e durabilidade/robustez associada ao conjunto veículo (incluindo parâmetros ligados a baterias em veículos eletrificados). Em termos de calendário, ele passa a valer a partir de 29/11/2026 para novos tipos (homologações novas) e 29/11/2027 para novos veículos (colocados no mercado) nas categorias M1 e N1. Para metais e ligas, isso é importante porque aumenta o foco em: (i) ligas/superfícies com melhor resistência ao desgaste (menos geração de partículas), (ii) estabilidade térmica, e (iii) durabilidade sob corrosão e ciclos térmicos — especialmente em veículos com maior massa e torque instantâneo (caso típico de elétricos) (UNECE, 2024; UNIÃO EUROPEIA, 2025).

3.2. EUA: Multi-Pollutant Emissions Standards e regulamentos estaduais



Nos Estados Unidos, o quadro é mais instável no momento. Do lado técnico-regulatório, a EPA (Environmental Protection Agency, Agência de Proteção Ambiental) publicou uma regra final chamada “Multi-Pollutant Emissions Standards” para veículos leves e médios a partir do ano-modelo 2027, visando reduzir poluentes e emissões ao longo do tempo (EPA, 2024). Ao mesmo tempo, em fevereiro de 2026, houve uma mudança grande de direção: reportagens apontam que o governo atual avançou para revogar a base regulatória federal usada para controlar gases de efeito estufa (o “endangerment finding” de 2009) e para desfazer limites federais de emissões para veículos, com expectativa de disputa judicial e aumento de incerteza para as montadoras. Esse tipo de incerteza costuma reforçar estratégias robustas de materiais: investir em soluções que melhoram eficiência e durabilidade em vários cenários (porque, mesmo que a regra federal oscile, há regras estaduais importantes). Um exemplo é a Califórnia, cujo órgão ambiental CARB/ARB (California Air Resources Board) adotou o ACC II (Advanced Clean Cars II), um roteiro que leva a 100% das vendas de carros novos ZEV (Zero Emission Vehicle, veículos de emissão zero no escapamento, com algumas categorias previstas na norma) até 2035 (VOLCOVICI; SHEPARDSON, 2026).

3.3. China: Regulamento China 6

Na China, a pressão regulatória vem do controle de poluição local e da padronização nacional de emissões. O padrão China 6 teve fases, e a China 6b aparece como um marco relevante no cronograma nacional (com implementação nacional em julho de 2023 amplamente reportada), apertando exigências e ampliando o controle de partículas e gases poluentes. Na prática, isso aumenta a necessidade de qualidade de processo e estabilidade de propriedades (materiais e juntas), porque as margens para variação de desempenho ficam menores quando o veículo precisa se manter limpo em mais condições de uso e ao longo de mais tempo (ICCT, 2017).

3.4. Índia: Regulamento Bharat Stage VI

Na Índia, a lógica é parecida: além do ensaio em escala laboratorial, cresceu a importância de medir emissões em uso real. As exigências conhecidas como RDE (Real Driving Emissions) foram introduzidas na fase mais recente do BS VI (Bharat Stage VI), com entrada em vigor em abril de 2023, justamente para reduzir a diferença entre emissões medidas em teste e emissões no dia a dia. Quando o regulador puxa o mundo real para dentro da regra, as montadoras tendem a valorizar materiais e rotas de fabricação que mantenham desempenho fora de uma “janela perfeita” (temperatura, carga, variação de processo), reduzindo dispersão e risco de falha (NARLA et al., 2024).

3.5. Brasil: PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores)

No Brasil, a evolução do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) segue a mesma tendência de fases progressivas. A etapa L8 para veículos leves começa em 1º de janeiro de 2025 e fica mais rigorosa ao longo dos anos seguintes (implantação faseada). Para ligas metálicas, isso normalmente se traduz em mais pressão por redução de massa (sem perder segurança), controle de corrosão (vida útil e confiabilidade) e manufatura com menos refugo (porque o custo total sobe quando a conformidade fica mais exigente) (ICCT, 2020).

3.6. Reino Unido: ZEV mandate

Por fim, há países que aceleram a transição não só por padrões de emissões, mas por metas de venda de veículos de emissão zero. No Reino Unido, o governo colocou em lei o ZEV mandate (mandato de veículos de emissão zero), com uma trajetória que leva a 80% dos carros novos e 70% das vans novas sendo zero emissão até 2030, chegando a 100% em 2035. Mesmo onde ainda existe espaço para motores a combustão no curto prazo, esse tipo de política faz com que requisitos típicos de veículos eletrificados (gestão térmica, resistência à corrosão em estruturas multi-materiais, blindagem eletromagnética, integração estrutural do conjunto) comecem a pesar mais cedo no desenho de ligas, tratamentos e processos.

4. A infraestrutura brasileira frente a necessidade de novos desenvolvimento e fornecimento de ligas metálicas

4.1. Panorama e infraestrutura produtiva da siderurgia brasileira (rotas, ativos e modernização)

A produção de aço no Brasil é, ao mesmo tempo, um “sistema industrial pesado” (altíssimo CAPEX, operação contínua, logística complexa) e uma base tecnológica essencial para cadeias como automotiva, bens de capital, construção, energia e óleo & gás. Em 2024, o parque produtor brasileiro reunia 31 usinas administradas por 11 grupos, com capacidade instalada de 51 Mt/ano de aço bruto e produção de 33,9 Mt (além de 117 mil colaboradores considerando próprios e terceiros). Esse porte mostra por que infraestrutura e P&D caminham juntos: competir em custo e qualidade depende tanto de ativos físicos (plantas, energia, logística) quanto de capacidade de desenvolver produtos (novos graus de aço) e processos (eficiência, estabilidade, baixo carbono) (INSTITUTO AÇO BRASIL, [s.d.]).

Do ponto de vista de infraestrutura, o Brasil combina diferentes rotas siderúrgicas e, com isso, diferentes necessidades de investimento. A rota integrada (de minério de ferro a aço), baseada em sinterização/coqueria, alto-forno e refino em aciaria a oxigênio (BOF/LD), é tipicamente a espinha dorsal da produção de aços planos (bobinas/chapas) usados em carroceria, estrutura, componentes estampados e partes galvanizadas. Já a rota semi-integrada, com forno elétrico a arco (EAF), tende a ser muito forte em aços longos (vergalhões, perfis, fio-máquina) e aços especiais, por trabalhar intensamente com sucata (e, quando bem suprida e bem controlada, ser um caminho importante de redução de emissões).

A literatura institucional do setor descreve essas rotas, sua lógica industrial e a relevância de energia, matérias-primas e co-produtos para competitividade (CNI; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017).

Essa arquitetura se materializa em um conjunto de ativos distribuídos majoritariamente no eixo Sudeste-Sul, com presença também em outros estados (por exemplo, plantas e unidades em MG, SP, RJ, ES, RS, SC, PA, PE, CE etc.). O Anuário Estatístico do Instituto Aço Brasil detalha as empresas e unidades, além de indicar características de infraestrutura associadas (como presença de alto-forno a coque, alto-forno a carvão vegetal, aciaria LD e forno elétrico, e linhas industriais conectadas a esses elos). Na prática, isso significa que uma parte relevante do investimento setorial não é apenas “aumentar capacidade”, mas modernizar e integrar etapas críticas: garantir estabilidade metalúrgica (controle de composição/impurezas), produtividade (menos paradas), qualidade superficial (especialmente para automotivo), e robustez de revestimentos (galvanização e ligas Al-Zn, por exemplo), tudo isso com consumo energético e emissões cada vez mais pressionados por mercado e regulação (CNI; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017).

4.2. Logística, suprimentos e exigências da cadeia automotiva (qualidade e estabilidade metalúrgica)

A infraestrutura também inclui uma dimensão frequentemente subestimada: logística e suprimento. Mesmo com vantagem natural em minério de ferro, a siderurgia integrada depende de insumos com cadeias globais (carvão metalúrgico, partes de ligas e refratários, tecnologias de controle e automação), e a rota EAF depende de sucata com qualidade e rastreabilidade, o que exige coleta, classificação, preparação e especificação por aplicação. Essa camada logística conversa diretamente com a automotiva: aços para carroceria e segurança (incluindo AHSS) exigem controle fino de composição, inclusão, textura e microestrutura; qualquer oscilação de insumo vira variação de estampabilidade, soldabilidade e desempenho em crash (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023).

4.3. Descarbonização e P&D como alavancas de competitividade (centros corporativos e rede aplicada)

Nos últimos anos, a infraestrutura passou a abranger um segundo eixo: descarbonização e eficiência energética. Um trabalho do BNDES Setorial (2025) trata a descarbonização da siderurgia como oportunidade competitiva e discute caminhos tecnológicos (incluindo maior uso de EAF, melhorias de eficiência, novas rotas e opções associadas a hidrogênio/DRI e captura), reforçando que transição climática está deixando de ser tema apenas ambiental e virando tema de investimento industrial e posicionamento internacional. Para o Brasil, isso interage com vantagens e desafios: potencial de eletricidade renovável e soluções com biomassa em parte das rotas; ao mesmo tempo, custos de energia, disponibilidade/qualidade de sucata e necessidade de CAPEX para atualização de plantas e processos (FERNANDES et al., 2025).

Quando você olha especificamente para investimentos em pesquisa e desenvolvimento, o Brasil tem um mosaico que combina centros de P&D corporativos, redes nacionais de pesquisa aplicada e parcerias com universidades e institutos. Do lado corporativo, é comum que siderúrgicas mantenham estruturas próprias de laboratório, simulação e desenvolvimento de produto, visto que o produto aço é, na prática, uma família enorme de microestruturas e propriedades, e cada grande cliente (automotivo, energia, linha branca) compra bom desempenho do seu material, não apenas tonelagem.

Um exemplo bem documentado é a CSN, cujo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (em Volta Redonda) é descrito como estrutura com 15 laboratórios para análises físicas, químicas, mecânicas e metalográficas, além de simulação física e computacional (incluindo equipamento como Gleeble para simular processos termomecânicos). A própria CSN explicita que desenvolve aços avançados para o mercado automotivo, citando categorias de AHSS (como Dual Phase), além de aços para estampagem a quente (PHS/Hot Forming). Isso é importante porque mostra o tipo de P&D que mais pesa para automotivo: não é só criar uma composição nova; é entregar janela de processo + desempenho + repetibilidade industrial (estampagem, solda, pintura, corrosão, crash) (CSN, 2026).

Outro exemplo é a Usiminas, que comunica a maturidade do seu Centro de Pesquisa, citando investimentos em equipamentos, técnicas de análise e simulações para otimização de processos e desenvolvimento/melhoria de aços (USIMINAS, 2021). Do mesmo modo, a ArcelorMittal Brasil aponta que seu Centro de P&D (na unidade de Tubarão, ES) atende demandas em desenvolvimento de produtos, processos e aplicações, com carteira de projetos e parcerias acadêmicas, um indicador direto de como P&D hoje é feito em “rede” (empresa + universidade + instituto + startups) (ARCELOMITTAL, 2025).

Além do P&D interno das empresas, o Brasil construiu, na última década, uma infraestrutura relevante de pesquisa aplicada via SENAI: são 28 Institutos SENAI de Inovação distribuídos nas cinco regiões, com base de pesquisadores e portfólio de projetos e recursos mobilizados em PD&I para a indústria. Para a siderurgia e sua cadeia (automotiva inclusa), isso importa porque parte das “dores” mais caras está no meio do caminho entre ciência e fábrica: caracterização avançada, ensaios de fadiga/corrosão, tribologia/desgaste, simulação termo-mecânica, validação de solda e estampagem, e desenvolvimento de revestimentos e rotas de produção mais limpas. Redes como essa ajudam a reduzir o tempo de maturação tecnológica e a “tropicalizar” soluções para matérias-primas, energia e condições industriais locais (SENAI, 2026).

5. A busca por ligas mais leves e resistentes: o que está mudando na prática

A tendência não é trocar todo o aço por alumínio ou magnésio ou compósito, e sim maximizar desempenho por kg e por CO₂ dentro de limites industriais. Na prática, isso se materializa em quatro frentes:

5.1. Aços avançados com melhor equilíbrio resistência–ductilidade

Aços AHSS e, em especial, famílias de 3ª geração buscam combinar alta resistência com ductilidade/conformabilidade mais altas, permitindo reduzir espessura sem perder desempenho em crash e durabilidade. Isso não é apenas liga: envolve engenharia microestrutural (TRIP/TWIP, bainita/martensita controladas) e controle de soldabilidade e fragilização. Referências técnicas de instituições como ORNL e guias de aplicação industrial reforçam o papel do AHSS como caminho de lightweighting com custo competitivo e robustez de manufatura, além de forte base de reciclagem e cadeia global madura (HU; FENG, 2021).

5.2. Alumínio estrutural e para gestão térmica

Alumínio cresce por extrusão, fundição e chapas em BIW, subestruturas e carcaças de bateria. A eletrificação adiciona o requisito de engenharia térmica: conduzir/dissipar calor, integrar canais, suportar ciclos térmicos e ambientes corrosivos (por exemplo, de eletrólitos e sais). O avanço relevante aqui costuma estar em ligas da família Al-Mg-Si e outras arquiteturas de precipitação e dispersóides para combinar resistência, corrosão e formabilidade e, do ponto de vista ESG, no aumento do conteúdo reciclado com controle de impurezas e desempenho (GONÇALVES et al., 2022).

5.3. Magnésio e titânio como soluções de nicho que podem expandir

Magnésio segue como alto potencial e altos desafios, sendo eles: densidade muito baixa, mas barreiras em corrosão, fadiga, custo de processamento e cadeia de suprimento. O padrão industrial tem sido usar Mg de forma seletiva onde o ganho por massa compensa a complexidade (e onde proteção superficial e projeto mitigam corrosão). Titânio permanece mais restrito por custo, mas pode avançar em componentes de alto desempenho e aplicações específicas (por exemplo, onde resistência específica, corrosão e temperatura justificam). De médio para longo prazo, avanços em processamento e reciclagem podem abrir espaço, mas sem substituir aço/alumínio de forma ampla (ICCT, 2016; GONÇALVES et al., 2022).

5.4. Vulnerabilidade: união e compatibilidade multi-material

A realidade do veículo moderno é multi-material. Isso torna o domínio de processos de união (solda a ponto em AHSS, laser, clinching, adesivos estruturais, soldas por Fricção, rebites, juntas híbridas) tão estratégico quanto a própria liga. Muitas novas ligas só viram produto quando sua janela de processamento e união é bem definida e isso impacta qualidade, produtividade, reparabilidade e reciclagem. Inclusive, atualmente, estudos relacionados ao desempenho de adesivos estruturais em tração, fadiga e expostos a ambientes com altas temperaturas de processamento estão sendo realizados, objetivando a junção de materiais dissimilares, diminuição de peso da junta, segurança e qualidade de trabalho ao operador e demais estratégias de redução de emissão e custos de fabricação (MARTINSEN; HU; CARLSON, 2015; TAN et al., 2021).

5.5. Ligas metálicas frente a polímeros, compósitos e outros materiais

Polímeros e compósitos cresceram muito, mas metais continuam centrais por razões técnicas e sistêmicas. A primeira é a reciclabilidade e escala industrial. Metais têm cadeias consolidadas de reciclagem e um “mercado secundário” funcional. Para compósitos reforçados com fibra (FRP/CFRP/GFRP), o fim de vida ainda é um desafio: há rotas de reciclagem (mecânica, térmica, química), mas custo, infraestrutura, perda de propriedades e padronização ainda limitam escala e isso aparece em revisões recentes sobre cenários de fim de vida e impactos ambientais. Comparativos de LCA (Life Cycle Assessment, ou Avaliação do Ciclo de Vida) entre alumínio e compósitos também mostram que o resultado depende fortemente do processo de fabricação, taxa de reciclagem e cenário de fim de vida, e que o ganho de massa não garante automaticamente melhor desempenho ambiental em todos os casos (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022).

A segunda refere-se ao comportamento em crash, reparabilidade e custo total. Aços avançados têm enorme base produtiva, previsibilidade e um ecossistema de processos e reparo. Compósitos podem entregar excelente rigidez específica, mas enfrentam barreiras de custo, tempo de ciclo, inspeção/reparo e comportamento sob impacto dependendo da arquitetura. Revisões de materiais leves discutem justamente essas trocas, reforçando que a superioridade depende do componente, do volume e do requisito de segurança/durabilidade (HU; FENG, 2021).

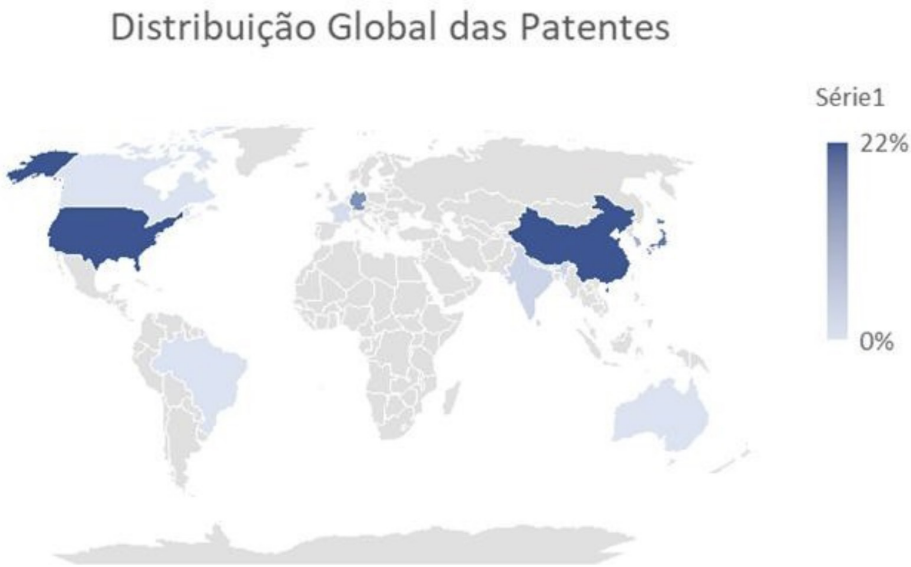
E por fim, a terceira é a função térmica/elétrica e robustez em ambientes severos. Para eletrificação, metais são praticamente incontornáveis em várias funções (condutividade, blindagem eletromagnética, dissipação térmica, contato elétrico confiável). Polímeros avançados ajudam em isolamento, redução de massa e design, mas raramente substituem a função elétrica/térmica sem penalidades.

6. Alumínio estrutural e para gestão térmica

6.1. Horizonte de Curto Prazo (até 3 anos)

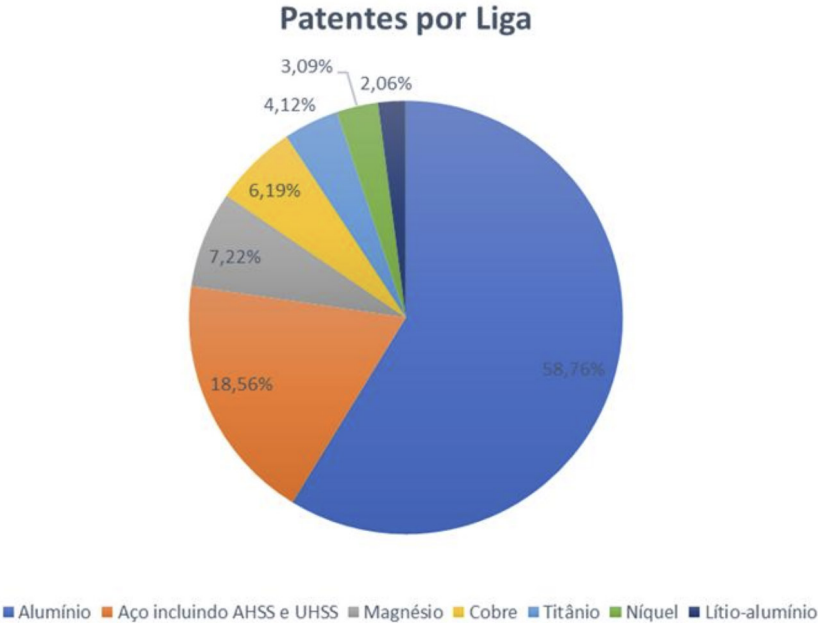
A Figura 1 ilustra a distribuição das patentes analisadas ao longo do mundo, visando o setor automotivo para veículos leves. Percebe-se que o maior teor de novos produtos e processos desenvolvidos focado em ligas metálicas se encontra concentrado nos Estados Unidos e na China, com participação relevante na Europa (especialmente Alemanha) e no Leste Asiático (Japão e Coreia do Sul). Em contrapartida, observa-se menor intensidade de depósitos nas demais regiões, indicando que a inovação em ligas e soluções metalúrgicas para o automotivo permanece fortemente centralizada nesses polos industriais e tecnológicos.

Figura 1 – Mapa Global da distribuição das patentes analisadas.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 2 – Distribuição do percentual de patentes concedidas, por tipo de liga.



Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 2 apresenta o cenário de curto prazo das tendências globais em ligas metálicas para o setor automotivo, a partir da distribuição de patentes por família de material. Observa-se uma forte concentração de inovação em alumínio, que responde por 58,76% dos depósitos. Esse protagonismo reflete a prioridade imediata da indústria em reduzir massa com soluções já relativamente maduras do ponto de vista industrial (processos, cadeia de suprimentos e escalabilidade), viabilizando ganhos rápidos em eficiência energética e alcance, especialmente em veículos eletrificados.

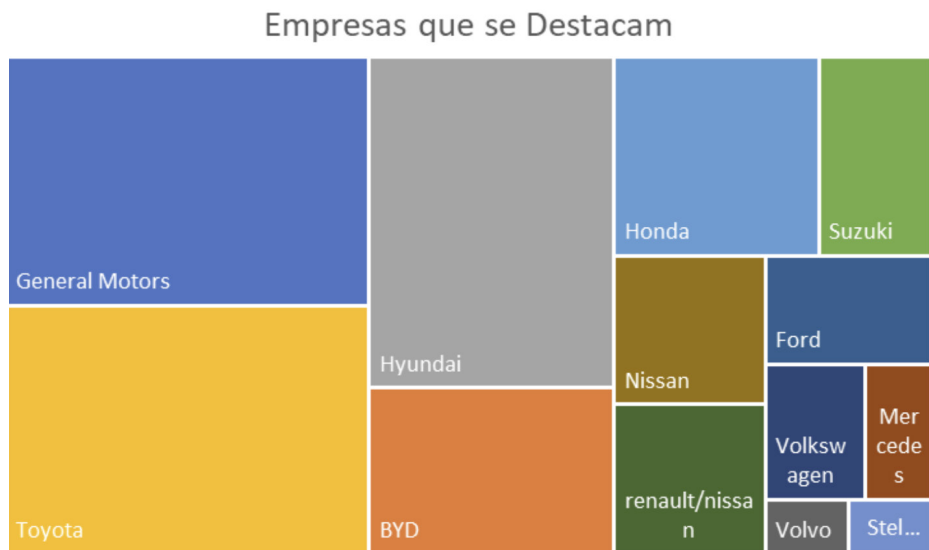
Em seguida, aparecem os aços, incluindo AHSS e UHSS, com 18,56% das patentes. Apesar do avanço dos materiais leves, os aços avançados seguem como um eixo central de desenvolvimento no curto prazo por combinarem alto desempenho estrutural, segurança em colisão, rigidez e competitividade de custo, além de se integrarem a uma base produtiva consolidada (estampagem, soldagem, revestimentos e engenharia de união). Assim, a tendência não indica substituição completa do aço, mas sim um reposicionamento: o alumínio cresce como principal frente de leveza, enquanto os aços avançados permanecem essenciais para requisitos críticos de estrutura e crash.

Na sequência, surgem materiais com participação intermediária: magnésio (7,22%) e cobre (6,19%). O magnésio aparece como alternativa relevante para redução adicional de massa, porém com adoção mais seletiva no curto prazo, em função de desafios de custo, corrosão, processamento e padronização industrial. Já o cobre tende a ganhar espaço impulsionado pela eletrificação, dada a necessidade crescente de condutividade elétrica e térmica em componentes como conectores, barramentos e soluções de gerenciamento térmico.

Por fim, titânio (4,12%), níquel (3,09%) e lítio-alumínio (2,06%) compõem um grupo de menor participação, característico de tendências mais nichadas no curto prazo. O titânio permanece associado a aplicações de alto desempenho (resistência específica e corrosão), mas limitado por custo. O níquel aparece ligado a requisitos mais específicos de temperatura/corrosão e, em alguns casos, a ecossistemas tecnológicos relacionados à eletrificação. O lítio-alumínio, ainda pouco representativo, sinaliza iniciativas voltadas a soluções de energia/baterias e combinações de materiais, porém com adoção mais restrita quando comparada às rotas dominantes de alumínio e aços avançados.

Em síntese, o panorama de curto prazo indica que a inovação em ligas metálicas para automóveis está ancorada em dois pilares principais: alumínio como principal vetor de lightweighting e aços AHSS/UHSS como base estrutural e de segurança, enquanto magnésio, cobre e ligas especiais avançam de forma complementar, guiados por demandas de eletrificação, desempenho e aplicações específicas.

Figura 3 – Empresas que se destacaram na busca das patentes concedidas.

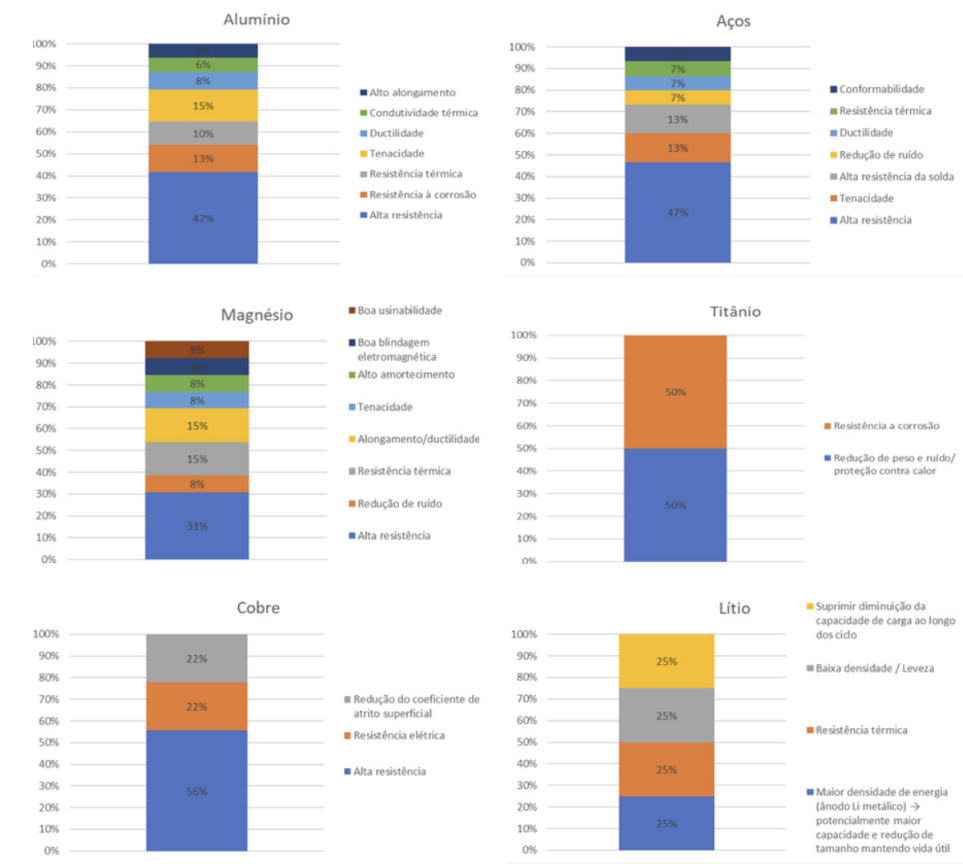


Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 3 apresenta as empresas que mais se destacam no conjunto de patentes analisado. Como a área de cada bloco representa o volume relativo de depósitos, observa-se uma concentração significativa em poucos grupos. Toyota e General Motors aparecem como os maiores blocos do gráfico, indicando liderança clara e maior intensidade de atividade tecnológica. Em seguida, Hyundai e BYD formam o segundo nível de destaque, reforçando a relevância recente de empresas asiáticas no avanço de soluções relacionadas a ligas metálicas e sua utilização no setor automotivo. Honda e Nissan surgem com participação intermediária, evidenciando presença consistente, embora abaixo do grupo líder. Por fim, empresas como Suzuki, Ford, Volkswagen, Mercedes, Volvo e Stellantis aparecem com áreas menores, compondo uma “cauda longa” de participação: são atores presentes no tema, mas com menor volume relativo dentro do recorte analisado. Em síntese, o gráfico indica que a inovação mapeada está fortemente concentrada em grandes montadoras com alta capacidade de P&D, com predominância de grupos do Japão, Estados Unidos e Ásia.

A Figura 4 consolida, dentre as ligas em destaque, quais propriedades estão sendo mais buscadas nos desenvolvimentos e processamentos de ligas metálicas e evidencia que as “dores” variam conforme o papel do material no veículo (estrutura leve, segurança, durabilidade e eletrificação).

Figura 4 – Principais propriedades buscadas nas ligas metálicas.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Para alumínio, o foco é claramente elevar desempenho mecânico sem perder as vantagens de leveza. A maior parcela das requisições está ligada à alta resistência mecânica (42%), seguida por tenacidade (15%) resistência à corrosão (13%) e resistência térmica (10%), o que sugere esforços

Em paralelo, aparecem metas de ductilidade (8%), além de demais itens diretamente associados ao lightweighting, como condutividade térmica de trocadores de calor. Em síntese, o alumínio é tratado como material “principal” de redução de massa, mas com demanda forte por robustez e durabilidade. .

Para os aços, a classe de aços avançados de alta resistência (AHSS) e ultra-alta resistência (UHSS) se sobressai e as propriedades mais buscadas convergem para um objetivo central: elevar o desempenho estrutural do veículo mantendo viabilidade de aplicação industrial. A alta resistência mecânica aparece como o requisito dominante, refletindo a necessidade de atender componentes críticos de carroceria e estrutura com maior capacidade de carga e rigidez, fundamentais para segurança e integridade estrutural.

Em paralelo, ganha destaque o conjunto de propriedades associadas ao desempenho em colisão, especialmente a absorção de energia/impacto. Esse ponto indica que não basta “ser mais resistente”: o material e a arquitetura do componente precisam garantir deformação controlada e comportamento seguro em crash, evitando falhas frágeis e preservando a função de proteção aos ocupantes. Assim, a tendência aponta para a busca de um equilíbrio entre resistência elevada e resposta mecânica adequada sob carregamentos dinâmicos.

Outro eixo relevante é a qualidade e robustez das juntas, traduzida por demandas de soldabilidade e resistência da união. Em AHSS/UHSS, a junta frequentemente se torna o elemento mais sensível do conjunto, e por isso há forte esforço em assegurar que processos de união (em especial soldagem) mantenham confiabilidade mecânica, repetibilidade e desempenho compatível com a resistência do material base. Complementarmente, aparecem requisitos ligados à processabilidade/conformabilidade, indicando que ampliar o uso desses aços depende também de tornar mais previsíveis e seguros os processos de fabricação e conformação.

Por fim, propriedades como resistência térmica, corrosão e desgaste surgem como fatores de durabilidade e robustez em condições reais de operação e produção. Mesmo com menor participação relativa, elas funcionam como restrições importantes, porque podem limitar a aplicação do material ou exigir soluções adicionais (tratamentos, revestimentos, ajustes de processo). Em síntese, o cenário retratado pelo gráfico reforça uma tendência clara: AHSS e UHSS avançam guiados por resistência estrutural e crash, mas com atenção crescente a união e fabricação, que são decisivas para transformar desempenho de material em desempenho do veículo.

Para magnésio, há uma prioridade clara em desempenho mecânico, com alta resistência (31%) como principal alvo. Em seguida, aparecem duas demandas quase equivalentes — resistência térmica (15%) e alongamento/ductilidade (15%) — indicando que a agenda não é apenas “ser leve”, mas suportar carga e temperatura sem perder capacidade de deformação. O restante das requisições se distribui em blocos menores (≈8% cada), destacando características funcionais bastante associadas ao magnésio no automotivo: redução de ruído, alto amortecimento, blindagem eletromagnética, boa usinabilidade e tenacidade. Em conjunto, isso sugere que o Mg está sendo buscado como material “leve”, porém com ênfase em robustez mecânica e em benefícios funcionais como ruído, vibração e aspereza, além de interferência magnética, que agregam valor em componentes específicos.

No caso do titânio, o gráfico é extremamente concentrado e evidencia uma lógica de nicho: as pesquisas se dividem igualmente entre resistência à corrosão (50%) e redução de peso e ruído/proteção contra calor (50%). Isso caracteriza o Ti como escolha para situações em que o ambiente de serviço é severo (corrosivo e/ou térmico) e, ao mesmo tempo, existe pressão por redução de massa e melhoria de conforto/isolamento. Ou seja, não é uma tendência “de volume”, mas sim uma rota para aplicações críticas em que o custo do material se justifica pelo ganho de desempenho e durabilidade.

Para cobre, a tendência é mais “direta” e com foco funcional: a maior parcela das requisições está em alta resistência (56%), seguida por resistência elétrica (22%) e redução do coeficiente de atrito superficial (22%). Esse perfil aponta que o cobre (ou ligas base cobre) não está sendo tratado apenas como condutor, mas como componente que precisa ser mecanicamente robusto, preservar desempenho elétrico sob condições de uso e, em alguns casos, melhorar comportamento superficial (atrito/desgaste), o que faz sentido em aplicações ligadas a conectividade elétrica, interconexões e contatos, especialmente em arquiteturas mais eletrificadas.

Por fim, para ligas de lítio, o gráfico indica uma agenda completamente alinhada a armazenamento de energia, com quatro frentes equivalentes (25% cada): maior densidade de energia (ânodo de Li metálico), resistência térmica, baixa densidade/leveza e redução de perda de capacidade ao longo dos ciclos (ciclagem). Isso evidencia que o foco está em viabilizar desempenho superior de bateria (mais energia por massa/volume), mas sem comprometer segurança térmica e vida útil, que são os gargalos típicos para adoção mais ampla de soluções baseadas em lítio metálico.

6.1.1. Cenário Nacional

6.1.1.1. Tendências

Para o Brasil, as ligas de alumínio (que se destacam globalmente) ganham força quando vem acompanhadas de estratégia de conteúdo reciclado e sucata bem tratada, porque isso ajuda diretamente na competitividade de custo e no desempenho ambiental; a reciclagem de alumínio é uma alavanca reconhecida por reduzir muito a energia e as emissões frente ao metal primário, e o país tem histórico forte de reciclagem em segmentos como embalagens, o que pode inspirar rotas de maior circularidade para o automotivo. Já aços avançados continuam muito relevantes porque permitem “fazer mais com menos”, usando engenharia de microestrutura e projeto de peça para reduzir espessura mantendo resistência, rigidez e segurança em colisão, com custo normalmente mais previsível do que alternativas leves. Além disso, a base industrial do aço no Brasil é grande e o tema de descarbonização do aço passa a ser estratégico porque regulações e clientes exigem cada vez mais rastreabilidade de emissões tanto em cenários de curto quanto de médio prazo. O magnésio, embora não seja material de “massa” no Brasil como aço e alumínio, aparece como tendência quando a prioridade é redução agressiva de peso em peças de fundição e quando há domínio de projeto contra corrosão, qualidade superficial e integração com outros materiais, mas em curto prazo apresenta-se viável em aplicações mais específicas. O cobre entra como uma tendência mais funcional do que estrutural, sendo difícil de ser substituído quando a peça precisa conduzir corrente, dissipar calor ou garantir robustez de conexão elétrica, e a eletrificação tende a elevar a importância desse tipo de requisito.

6.1.1.2. Oportunidades

A primeira oportunidade é combinar custo e escala com uma agenda de eficiência e emissões: o país pode capturar ganhos rápidos usando melhor o que já domina (aços e alumínio) e elevando o nível de engenharia, por exemplo com desenho mais otimizado, redução de espessura com aços avançados, melhor controle de soldagem e proteção anticorrosiva, e uso crescente de alumínio secundário com controle de impurezas e propriedades. Isso conversa diretamente com a trajetória regulatória: no Brasil, o PROCONVE L8 elevou o nível de exigência para veículos leves, o que aumenta o valor de soluções que reduzam consumo e melhorem robustez ao longo da vida útil. A segunda oportunidade é aproveitar políticas industriais que empurram inovação e investimento.

O Rota 2030, e depois o Programa Mover, foram desenhados justamente para estimular desenvolvimento tecnológico e eficiência no setor automotivo, criando espaço para projetos que conectem materiais, processos e desempenho. A terceira oportunidade é organizar melhor a cadeia de sucata e circularidade, porque, no Brasil sensível a custo, reciclagem bem feita vira vantagem competitiva: melhora ESG, reduz dependência de insumos primários e pode estabilizar custo do material ao longo do tempo.

6.1.1.3. Desafios

O maior desafio é que criar bons materiais não basta, ele precisa ser barato, repetível e fabricável em alto volume. Isso coloca pressão em capacidade de processo, qualidade e taxa de refugo. Para aços avançados, o gargalo costuma aparecer em formabilidade, trincas, retorno elástico e soldabilidade, exigindo engenharia de processo e controle fino. Para alumínio e magnésio, o desafio típico é garantir propriedade mecânica com estabilidade, controle de defeitos de fundição/conformação, e, no caso do magnésio, vencer a barreira de corrosão e proteção superficial sem elevar custo demais. Outro desafio é a dependência e volatilidade de suprimentos em alguns metais e ligas: magnésio e certos elementos de liga têm mercado global concentrado e podem sofrer com choques de oferta e preço, o que é crítico para um país onde custo define escolhas. Por fim, existe o desafio de multi-materiais: a indústria quer combinar aço e alumínio, ou inserir cobre, ou usar magnésio em partes específicas, mas isso exige domínio de união de materiais diferentes, controle de corrosão galvânica e validação de durabilidade. Se isso não estiver maduro, o risco de custo por retrabalho e garantia cresce e a tendência não vira aplicação.

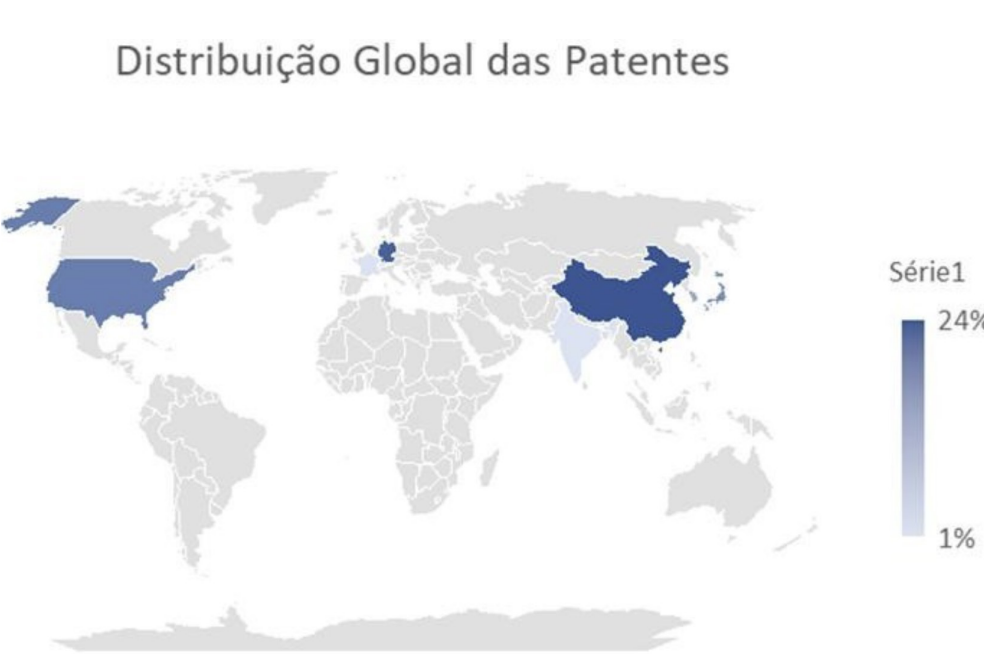
6.1.1.4. Necessidades

Para o Brasil capturar essas quatro tendências com competitividade, as necessidades mais imediatas são bem práticas. A primeira é fortalecer infraestrutura de engenharia aplicada: laboratórios e rotinas de teste para corrosão, fadiga, impacto, soldagem e validação de juntas, porque é aí que muitos projetos “morrem” quando saem do papel.

A segunda é investir em capacidade de processo e controle de qualidade, sobretudo para reduzir dispersão e refugo em aços avançados e em ligas leves. A terceira é desenvolver cadeia e especificações para reciclagem automotiva com qualidade metalúrgica, incluindo rastreabilidade de sucata, separação por liga e limites de impurezas, porque isso ataca simultaneamente custo e ESG. A quarta é conectar P&D com o que a política industrial pede: projetos alinhados a programas como Rota 2030 e o Mover tendem a ter mais chance de ganhar tração, justamente porque tratam inovação como requisito para competitividade e descarbonização. E, como pano de fundo, cresce a necessidade de olhar a cadeia completa: eletrificação e transição energética aumentam a competição por metais como cobre e por insumos críticos, então mapear risco de suprimento, alternativas técnicas e estratégias de substituição passa a ser parte da engenharia, não só da compra.

6.2. Horizonte de médio prazo (até 5 anos)

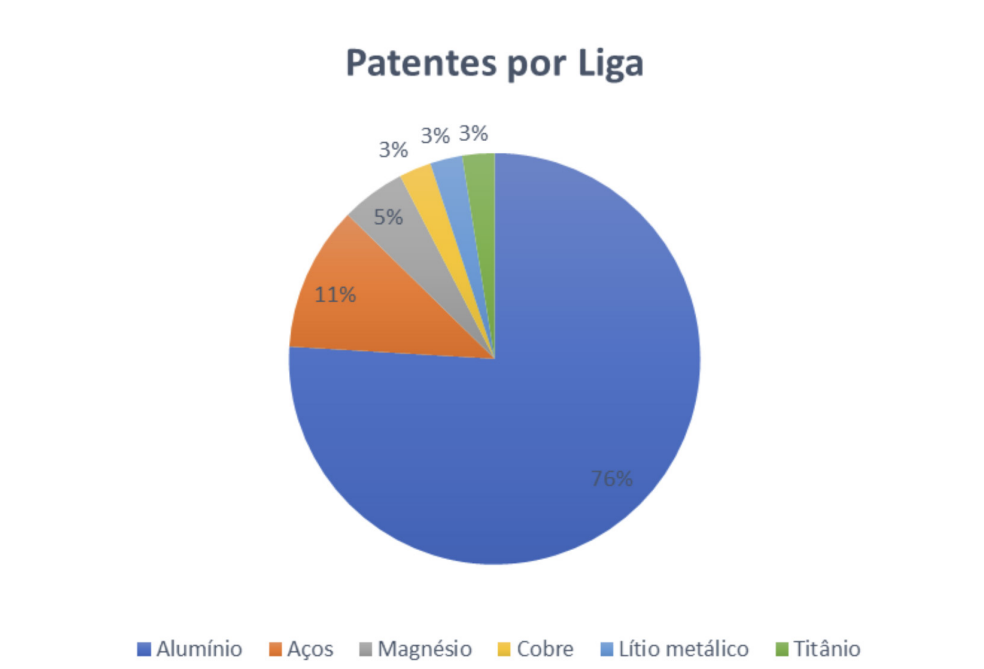
Figura 5 – Mapa Global da distribuição das patentes analisadas.



Fonte: Elaboração própria (2026).

A partir da Figura 5, observa-se que a centralidade da inovação tende a se manter nos principais polos industriais, com China e Estados Unidos figurando como os maiores concentradores de depósitos. sinal de que, nesse horizonte, as soluções mais promissoras devem avançar para maturação tecnológica, escalabilidade e aplicação industrial principalmente onde há maior capacidade de P&D e manufatura. Em paralelo, nota-se uma participação relevante de países-chave da Europa (com destaque para a Alemanha) e do Leste Asiático (Japão e Coreia do Sul), regiões que historicamente lideram a engenharia de materiais e a integração de ligas em componentes estruturais, de segurança e, cada vez mais, em sistemas ligados à eletrificação. Por outro lado, a menor intensidade observada nas demais regiões sugere que, no médio prazo, a consolidação das tendências deve ocorrer de forma mais concentrada, com difusão gradual para outros mercados à medida que tecnologias e rotas de processamento se estabilizam e passam a ser replicadas fora desses centros.

Figura 6 – Distribuição do percentual de patentes depositadas, por tipo de liga.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Nesse horizonte, a inovação permanece fortemente direcionada a redução de massa (lightweighting) e à eletrificação, com impacto direto na seleção de ligas e nos requisitos de desempenho. O dado mais evidente é evidenciado na Figura 6: a predominância do alumínio (76%), indicando que, no médio prazo, a estratégia global é ampliar o uso de ligas de Al não apenas em peças tradicionalmente leves, mas também em componentes mais exigidos. As patentes associadas ao alumínio convergem para dois eixos, sendo eles:

1) estruturas e chassi (subframes, longarinas/rails, barras estruturais, direção, knuckles, rodas, fabricação de componentes estruturais de grande porte via fundição sob pressão) e

2) eletromobilidade, sobretudo em carcaças, frames e elementos de gestão térmica de baterias (dissipadores de calor, canais, placas de resfriamento e insertos condutivos). Em paralelo, o foco técnico recorrente é elevar a robustez do alumínio, ou seja, promover ganhos em resistência mecânica, ductilidade/tenacidade, fadiga, corrosão, resistência térmica e condutividade térmica, para que o material sustente funções mais críticas sem perder a vantagem de leveza.

Nesse horizonte, o foco da utilização das ligas de alumínio se estende para a reciclabilidade, embora hajam desafios de composição química e presença de impurezas como o Ferro, que em presença nas ligas de alumínio, degrada as propriedades mecânicas pela presença de intermetálicos, fator limitante para o setor automotivo e a base de temas que vem ganhando espaço nos estudos atuais, visando futuras aplicações.

Os aços (11%) aparecem como a segunda frente e reforçam uma tendência complementar: no médio prazo, a inovação em aço está menos sobre substituir tudo por aço e mais sobre viabilizar alto desempenho estrutural com fabricação estável em classes AHSS/UHSS. Isso se traduz em trabalhos focados em conformação e rotas térmicas (aquecimento seletivo, press hardening parcial, geometrias sem trinca) e em integridade metalúrgica associada à produção/união (controle de trincas a frio, fragilização por hidrogênio e fragilização por metal líquido - LME), aspectos críticos para manter repetibilidade e segurança quando se trabalha com resistências elevadas.

O magnésio (5%) surge como uma rota de médio prazo para nichos onde se busca ir além do alumínio em redução de massa, normalmente associado a funções que o Mg entrega bem: baixa densidade, alto amortecimento/absorção de vibração, blindagem eletromagnética e melhoria de propriedades mecânicas com ligas e tratamentos, além de esforços voltados à processabilidade dessa ligas, por exemplo: extrusão e conformação em condições mais exigentes. Isso sugere crescimento seletivo: menos volume que Al, mas com aplicações estratégicas.

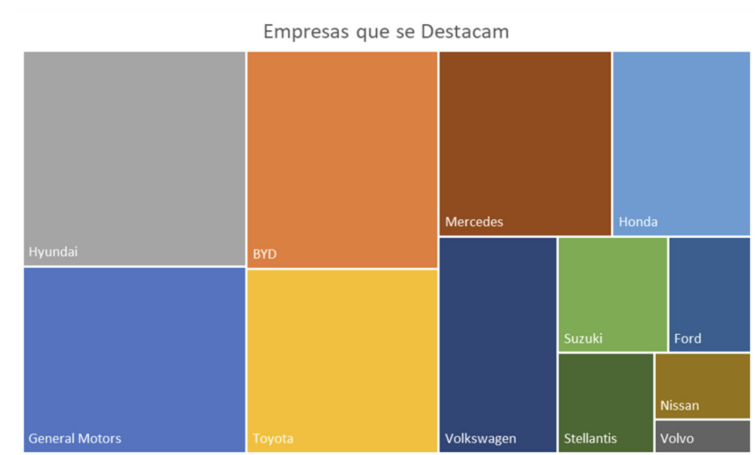
O cobre (3%) está ligado principalmente à eletrificação e eletrônica automotiva, aparecendo em terminais, conectores, coletores de corrente e interfaces metálicas. No médio prazo, a pauta é elevar condutividade elétrica, confiabilidade de contato e durabilidade, evitando compostos frágeis em uniões de materiais dissimilares e reduzindo perdas/forças de inserção via camadas e revestimentos (arquiteturas do tipo Cu/Ni/Ag/Sn). Também aparece em soluções de gestão térmica, onde a condução de calor é determinante.

O lítio metálico (3%) aparece como uma tendência de médio prazo ligada principalmente a baterias. A ideia é aumentar a densidade de energia, ou seja, conseguir mais autonomia com menos volume e peso do pacote de bateria, sem perder vida útil. Por isso, as soluções também focam em reduzir a degradação ao longo dos ciclos e em melhorar a segurança térmica, tentando evitar ou limitar a propagação de falhas por superaquecimento.

Já o titânio (3%) tende a ser usado em aplicações onde seu custo se justifica por oferecer alta resistência à corrosão, estabilidade química e confiabilidade. Isso inclui, por exemplo, conexões e tubulações de veículos de alto desempenho, combinando proteção contra corrosão e confiabilidade.

Em síntese, os depósitos de 2021–2025 sinalizam que, no horizonte de médio, o setor automotivo deve consolidar: alumínio como material dominante para redução de massa e arquitetura de baterias, aços avançados como pilar de segurança/rigidez com foco em manufatura sem falhas, e Cu/Mg/Li/Ti em papéis mais especializados (eletrificação/contatos e térmica, amortecimento e leveza extrema, densidade de energia, resistência à corrosão e aplicações críticas). No contexto nacional, falaremos mais adiante, quais dessas aplicações se tornam mais viáveis à realidade do Brasil.

Figura 7 – Empresas que se destacaram na busca das patentes depositadas.



Fonte: Elaboração própria (2026).

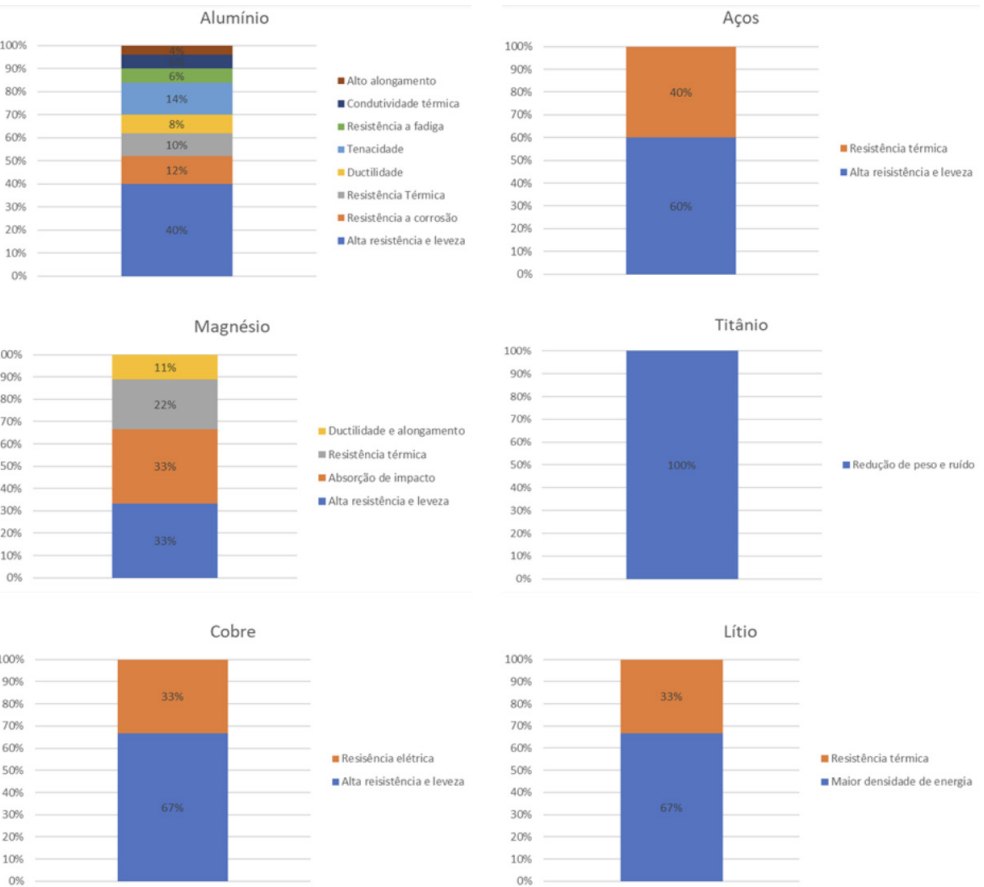
Observa-se um primeiro patamar de protagonismo formado por Hyundai, General Motors, BYD e Toyota, que ocupam os maiores blocos e, portanto, respondem pela maior parcela do volume total no período. Esse resultado indica que, no horizonte de médio prazo, esses grupos vêm sustentando um ritmo elevado de desenvolvimento e/ou aplicação de soluções com materiais metálicos (seja em componentes, rotas de fabricação, integração de sistemas ou melhorias de desempenho), reforçando a centralização da inovação em players com forte escala industrial e cadeia tecnológica consolidada.

Em um segundo patamar, aparecem Volkswagen, Mercedes e Honda, com participação ainda relevante, porém inferior ao grupo líder. Na prática, esses blocos intermediários sugerem uma atuação consistente — com portfólio contínuo, mas com menor intensidade de depósito quando comparada aos quatro maiores.

Por fim, o gráfico mostra uma “cauda” de empresas com participação menor, composta por Suzuki, Ford, Stellantis, Nissan e Volvo. Embora individualmente representem uma fração menor do total, elas ainda aparecem como atores ativos no período, indicando que há iniciativas e nichos tecnológicos em andamento, porém com menor volume de patentes depositadas no recorte analisado.

Em conjunto, o treemap reforça que, entre 2021 e 2025, a tendência de médio prazo em inovação relacionada a ligas metálicas no automotivo é marcada por forte concentração em poucos grupos líderes, seguida por um bloco intermediário relevante e uma base de participantes com menor intensidade de depósitos.

Figura 8 – Representação das principais propriedades abordadas para cada liga.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Para alumínio, o perfil é o mais completo: além de alta resistência e leveza (40%), aparecem exigências relevantes de tenacidade (14%), resistência à corrosão (12%) e resistência térmica (10%), seguidas por ductilidade (8%), fadiga (6%), condutividade térmica (6%) e alto alongamento (4%). Isso sugere uso crescente em componentes estruturais e funcionais que precisam manter desempenho mecânico, durabilidade e estabilidade térmica.

Nos aços, a demanda se concentra em duas frentes: alta resistência com leveza (60%) e resistência térmica (40%). Em outras palavras, o foco é maximizar desempenho estrutural/segurança (com otimização de massa) e suportar condições térmicas mais severas em aplicações específicas.

Para magnésio, o gráfico reforça a lógica de lightweighting, mas com maior ênfase em comportamento em serviço: alta resistência e leveza (33%) e absorção de impacto (33%) aparecem no topo, com resistência térmica (22%) e ductilidade/alongamento (11%) como suporte. Isso indica que, além de leve, o Mg precisa responder bem a solicitações dinâmicas e manter estabilidade em temperatura.

Em titânio, a leitura é direta: o destaque é redução de peso e ruído (100%), apontando aplicações mais “premium” e localizadas, onde o ganho de massa/NVH e a confiabilidade justificam o custo.

Para cobre, as prioridades refletem eletrificação e condução: além de alta resistência e leveza (67%) (normalmente ligada a reduzir seção/peso mantendo robustez), aparece resistência elétrica (33%), coerente com terminais, barramentos, conectores e componentes condutivos.

Por fim, em lítio, o foco está em baterias e segurança: maior densidade de energia (67%) domina, com resistência térmica (33%) como requisito crítico para estabilidade e mitigação de riscos em operação (controle de temperatura e integridade do sistema).

6.2.1. Cenário Nacional

6.2.1.1. Tendências

No cenário de médio prazo, a leitura geral é que o Brasil tende a definir as escolhas de ligas por uma combinação bem pragmática de custo, capacidade industrial já instalada e pressão regulatória (emissões e eficiência), enquanto a eletrificação avança de forma seletiva.

Em tendências que melhor se aplicam ao Brasil, o alumínio tende a ser atrativo em médio prazo, para aplicações em que ele já é competitivo no país: estruturas leves, componentes de carroceria e, principalmente, peças em que reciclabilidade e conteúdo reciclado contam para ESG e para custo quando existe cadeia de sucata bem organizada. Esse ponto é importante, pois como já mencionado, o Brasil tem histórico de reciclagem muito forte em alumínio, e a própria associação do setor destaca que reciclar alumínio reduz drasticamente consumo de energia e emissões em relação ao metal primário. Ao mesmo tempo, os aços avançados ainda seguem muito relevantes por custo e por desempenho estrutural, usando classes de maior resistência para reduzir espessuras sem perder segurança. Essa direção conversa com o ambiente regulatório brasileiro, como o Proconve e suas fases mais recentes para veículos leves. Já o magnésio, para médio prazo no Brasil, tende a avançar, porém ainda de maneira leve, em nichos. Por fim, o cobre terá destaque principalmente pela eletrificação e pelo aumento de conteúdo elétrico no veículo em médio prazo, cenário que vem crescendo no Brasil nos últimos anos e que tende a ser expandido, alavancando materiais condutores e soluções de gestão térmica.

6.2.1.2. Oportunidades

Nas oportunidades, o Brasil tem um espaço muito interessante para capturar valor com uma estratégia de materiais que una baixo carbono e baixo custo. Um caminho é ampliar o uso de sucata e rotas de menor emissão na indústria local (quando tecnicamente possível), reforçando circularidade e previsibilidade de custo. E, novamente, outro é usar os instrumentos de política industrial para aproximar montadoras, autopeças e universidades em projetos aplicados de materiais e processos. Aqui entram os programas setoriais e seus mecanismos de incentivo e P&D, como o Programa Mover, e o histórico do Rota 2030 como base de organização de prioridades tecnológicas. Na prática, isso abre oportunidade para adaptar soluções às condições locais: ligas e tratamentos voltados para durabilidade em ambiente úmido, corrosivo e com grande variação de qualidade de vias, além de soluções de fabricação que reduzam refugo e custo total.

6.2.1.3. Desafios

Nos desafios, o mais recorrente é que o Brasil costuma operar com margens apertadas e alta sensibilidade a preço, então a adoção de ligas novas só acontece quando elas reduzem custo do sistema (não só custo do quilo do metal). Isso torna crítico resolver gargalos metalúrgicos clássicos do multimaterial: união de materiais diferentes, risco de corrosão galvânica, dispersão de qualidade no processo (solda, adesivos, fixação mecânica), e desempenho consistente ao longo da vida útil. Também pesa o desafio de cadeia de suprimentos: disponibilidade de ligas específicas, qualidade de sucata (impurezas) e capacidade de entregar semiacabados com repetibilidade. Além disso, a eletrificação aumenta o conteúdo funcional do veículo e pressiona a engenharia térmica e elétrica; o crescimento acelerado de demanda global por baterias reforça competição por materiais e pode aumentar volatilidade de custo e prazos.

6.2.1.4. Necessidades

Nas necessidades, o Brasil tende a ganhar mais se focar em três frentes bem objetivas. A primeira é infraestrutura e engenharia de processo: laboratórios e rotinas de validação industrial para corrosão, fadiga, crash e juntas multimateriais, com digitalização de processo para reduzir dispersão e refugo. A segunda é P&D aplicado em materiais custo-efetivos, isto é, melhorar desempenho de famílias já dominadas (aços avançados e alumínio) e resolver as dores de fabricação e durabilidade que impedem escala. A terceira é política e coordenação de cadeia, para amarrar conteúdo local, reciclagem e metas de eficiência/emissões em um caminho crível para a indústria. Programas como o Mover existem justamente para organizar parte dessa agenda de inovação e descarbonização no setor automotivo.

6.3. Horizonte de longo prazo (até 10 anos)

Figura 9 – Mapa Global da distribuição dos artigos analisados.



Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 9 apresenta a distribuição mundial dos artigos científicos analisados (base acadêmica) relacionados a ligas metálicas e aplicações no setor automotivo de veículos leves. Observa-se uma concentração relevante na China, indicando forte volume de produção científica e atividade de pesquisa em materiais e processos metalúrgicos aplicados ao automotivo. Em seguida, aparecem contribuições importantes dos Estados Unidos e de países do Leste Asiático (com destaque para Japão e Coreia do Sul), além de participação consistente na Europa (especialmente em países com tradição em engenharia automotiva e metalurgia). Por outro lado, as demais regiões apresentam menor presença relativa de publicações, sugerindo que o avanço científico nesse tema permanece mais intenso em polos onde há maior integração entre universidades, centros de P&D e indústria automotiva, o que tende a acelerar a geração de conhecimento e sua transferência para aplicações tecnológicas.

Figura 10 – Distribuição do percentual de patentes depositadas, por tipo de liga.



Fonte: Elaboração própria (2026).

O gráfico da Figura 10, ilustra o percentual de artigos por liga, evidenciando que a base científica também está fortemente concentrada em materiais de redução de massa, com clara liderança do alumínio (46%) e, em seguida, do magnésio (20%). Esse resultado é coerente com a prioridade do setor automotivo em lightweighting: substituir materiais mais densos por ligas leves, porém sem renunciar a desempenho estrutural, durabilidade e segurança.

Um segundo bloco relevante é o das famílias de aços, que somadas representam um volume expressivo de publicações (Aços de outras classes 6% + Outros AHSS 12% + TWIP 3%). Essa distribuição sugere que, apesar do avanço de ligas leves, a literatura segue investindo bastante em aços avançados (AHSS/UHSS/TRIP/TWIP) para atender requisitos de alta resistência, absorção de energia em impacto e boa conformabilidade, especialmente em aplicações estruturais e de segurança.

O titânio (7%) aparece como um tema de nicho, típico de estudos voltados a alta resistência específica, corrosão e confiabilidade em condições mais críticas (onde o custo se justifica por desempenho). Por fim, as demais classes (ferro, ligas de cobre/bronze e ligas base níquel/superaligas) aparecem com participação pequena (tipicamente $\leq 3\%$ cada), indicando interesse mais direcionado a funções específicas – por exemplo, condutividade elétrica/térmica (cobre), soluções magnéticas/funcionais (ferro) e ambientes severos/alta temperatura (base níquel).

Figura 11 – Empresas que se destacaram na busca das patentes depositadas.



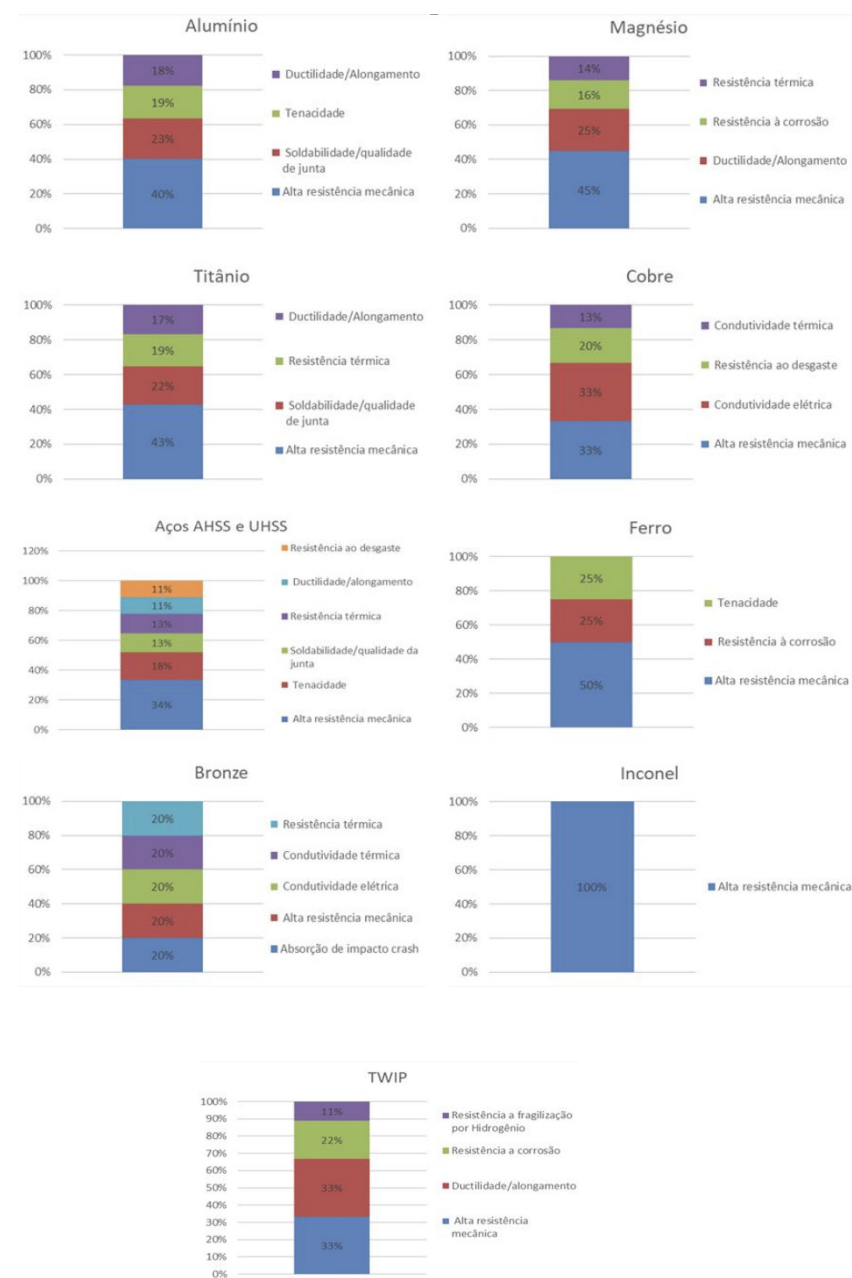
Fonte: Elaboração própria (2026).

O gráfico da Figura 11 reforça que a produção científica mais expressiva do conjunto está concentrada em universidades e institutos de pesquisa predominantemente na China. Entre os maiores destaques aparecem a University of Science & Technology Beijing (USTB), a Northeastern University (China), a Central South University e a Shanghai Jiao Tong University, todas localizadas na China, indicando um polo muito ativo e contínuo em pesquisa de materiais metálicos e aplicações associadas ao setor automotivo.

Além do bloco chinês, observa-se um segundo eixo relevante no Japão, com Tohoku University e University of Osaka, sinalizando participação forte de grupos japoneses em temas de engenharia de materiais, caracterização e otimização de desempenho. O gráfico também evidencia o papel de institutos nacionais chineses, como a Chinese Academy of Sciences (CAS) e o Institute of Metal Research, CAS, que normalmente concentram infraestrutura pesada e projetos de alto impacto em metalurgia.

Fora da Ásia, surgem contribuições importantes, porém menores em volume relativo: a RWTH Aachen University (Alemanha) e a University of Zilina (Eslováquia) representam a presença europeia, o Korea Institute of Industrial Technology (Coreia do Sul) aponta um polo tecnológico adicional no Leste Asiático, e aparecem ainda o Indian Institute of Technology System (Índia) e a Egyptian Knowledge Bank (EKB) (Egito). Por fim, instituições chinesas adicionais como Harbin Institute of Technology e Jilin University, além da Huazhong University of Science & Technology, reforçam a dispersão interna de centros produtivos dentro do próprio país.

Figura 12 – Representação das principais propriedades abordadas para cada liga.



Os gráficos da Figura 12 confirmam que o padrão dominante em praticamente todos os materiais é a alta resistência, mas o 2º e 3º requisitos mudam bastante para cada lógica de aplicação: carroceria/estrutura, powertrain, eletrificação, painel, etc.

No alumínio, a distribuição mostra um perfil típico de aplicações automotivas leves: alta resistência mecânica (40%) como base, e logo depois soldabilidade/qualidade de junta (23%), tenacidade (19%) e ductilidade/alongamento (18%). Isso sugere que, além de deixar a peça leve, o grande gargalo recorrente é conseguir juntar alumínio com confiabilidade (solda, clinch, rebite, adesivo, seja com a própria liga ou com ligas dissimilares) sem perder propriedades mecânicas e sem criar dispersão no processo. A presença relativamente alta de tenacidade e de ductilidade/alongamento sugere que, além de reduzir massa, há um esforço para garantir deformação estável e absorção de energia em colisões (crashworthiness) e outro objetivo é manter formabilidade suficiente durante estampagem e conformação, reduzindo risco de trincas e variabilidade na produção.

No magnésio, o padrão começa buscando altos valores de resistência mecânica (45%), porém aparecem com peso ductilidade/alongamento (25%), resistência à corrosão (16%) e resistência térmica (14%). Isso é bem característico do Mg: ele é muito atraente por densidade baixa, mas as dores mais frequentes viram corrosão/proteção (por risco de corrosão galvânica em multimateriais), além de comportamento em temperatura (creep/estabilidade) e necessidade de manter ductilidade suficiente para processamento seguido de aplicação.

No titânio, o pacote reforça uma aplicação mais seletiva e menos viável financeiramente, onde performance compensa custo. Estudos direcionados a alta resistência mecânica (43%), depois soldabilidade/qualidade de junta (22%), resistência térmica (19%) e ductilidade (17%). O Ti aparece muito ligado a ambientes severos (temperatura, corrosão específica, fadiga) e a desafios de junção (processos mais críticos, controle de zona afetada pelo calor, compatibilidade de união com outros materiais). Mas de modo geral, o Ti tem aplicações bem específicas e entra quando o projeto precisa de uma margem de segurança maior em regimes extremos.

O cobre apresenta um perfil fortemente associado à eletrificação e gestão de energia: alta resistência mecânica (33%) e condutividade elétrica (33%) aparecem empatadas como requisitos principais, seguidas por resistência ao desgaste (20%) e condutividade térmica (13%). O requisito de desgaste se relaciona com peças que precisam conduzir corrente e ao mesmo tempo aguentar vibração/força/contato (terminais, conectores, barramentos, trilhas, contatos), além de pontos onde calor precisa ser conduzido/dissipado.

Fonte: Elaboração própria (2026).

Nos aços avançados, a história fica ainda mais interessante porque a demanda de métodos de junção sobe bastante em certas classes. Em UHSS (ultra-high strength steel), nota-se a busca por valores cada vez mais elevados de resistência mecânica (60%) e um segundo bloco enorme de soldabilidade/qualidade de junta (40%). Isso combina com a realidade industrial: quanto mais resistente e complexa a microestrutura, maior tende a ser o cuidado com janela de solda (especialmente solda a ponto), sensibilidade a defeitos e variabilidade de qualidade de junta. Ou seja, boa parte da agenda de UHSS para o setor automotivo é processo + controle, não só composição.

No caso dos aços TWIP, o padrão de propriedades requisitadas indica uma busca clara por desempenho mecânico combinado com elevada capacidade de deformação. A distribuição mostra que alta resistência mecânica e ductilidade ou alongamento aparecem com a mesma importância (33%). Esse equilíbrio é coerente com o princípio metalúrgico do TWIP, em que o encruamento é intensificado por maclação durante a deformação, elevando a resistência ao mesmo tempo em que mantém deformação estável antes da fratura. Em aplicações automotivas, esse comportamento é especialmente valorizado quando a peça precisa absorver energia de forma controlada e previsível, como em componentes estruturais sujeitos a impacto, onde a fratura prematura é inaceitável. Além disso, a presença relevante de resistência à corrosão (22%) aponta que, na prática, não basta ter desempenho mecânico: é preciso garantir durabilidade em ambientes reais de serviço, que incluem umidade, sais e variações térmicas. O aparecimento de resistência à fragilização por hidrogênio (11%), mesmo com menor participação, é um sinal importante de maturidade industrial do tema: para aços de alta resistência, o hidrogênio pode reduzir drasticamente a resistência à fratura e a vida em fadiga, sobretudo quando há tensões residuais, entalhes, bordas cortadas ou regiões soldadas. Por isso, essa propriedade costuma ser associada a preocupações com rotas de processo e superfície, como decapagem, galvanização, exposição corrosiva e controle de microestrutura que minimize susceptibilidade.

Para os aços AHSS analisados como um grupo, a distribuição de propriedades é mais dispersa, o que sugere que o conjunto reúne diferentes famílias e aplicações dentro do universo de aços avançados. A maior parcela continua ligada à alta resistência mecânica (33%), refletindo o objetivo central do AHSS no automotivo: reduzir massa por redução de espessura sem perder desempenho estrutural.

Logo em seguida, a tenacidade aparece com peso elevado (19%), reforçando que o ganho de resistência precisa vir acompanhado de tolerância a dano, isto é, capacidade de resistir a trincas, entalhes, bordas e condições de impacto sem transição para fratura frágil. A resistência térmica também surge de forma significativa (14%), o que é consistente com aplicações próximas a fontes de calor, com ciclos térmicos ou com requisitos de estabilidade microestrutural e de propriedades ao longo do uso. Em um segundo nível, ductilidade/alongamento, soldabilidade/qualidade de junta, e resistência ao desgaste aparecem com participações similares (12%). Isso indica que, para viabilizar AHSS em escala, a engenharia não pode focar apenas na resistência: precisa manter formabilidade suficiente para fabricação, controlar qualidade de união em processos como solda a ponto e outras rotas de junta, e garantir robustez tribológica em regiões com contato e atrito, onde desgaste pode comprometer tolerâncias, ruído e vida útil. Em síntese, quando o AHSS é visto como cesta tecnológica, ele se posiciona como solução de desempenho estrutural que depende fortemente de equilíbrio entre propriedades em serviço e viabilidade de manufatura, com atenção a variabilidade de processo e aos efeitos de microestrutura nas regiões de corte, conformação e união.

No grupo Ferro, o gráfico evidencia o clássico: alta resistência mecânica (50%) e dois requisitos empatados em resistência à corrosão (25%) e tenacidade (25%). Isso lembra aplicações onde ferro/ligas ferrosas aparecem como solução de custo/robustez e a pauta vira durabilidade (corrosão) e resistência a dano (tenacidade), além de resistência básica.

Nas ligas de bronze, os requisitos aparecem totalmente balanceados (20% para cada item: resistência mecânica, condutividade elétrica, condutividade térmica e resistência térmica). Esse padrão geralmente indica uso mais multifuncional (contato elétrico, transferência de calor, resistência em operação), mas também pode sinalizar amostra pequena (quando há poucos registros, as porcentagens ficam em degraus iguais). O Inconel, ainda com baixo destaque, aparece com requisito de alta resistência mecânica, o que quase certamente indica poucos casos no seu conjunto e/ou foco muito específico (alto desempenho mecânico/temperatura).

6.3.1. Cenário Nacional

6.3.1.1. Tendências

No Brasil, onde custo e escala pesam muito, as tendências de ligas do longo prazo tendem a se consolidar onde existe base industrial instalada, volume e/ou forte ganho de eficiência no veículo. Por isso, alumínio aparece como a tendência mais “natural” para crescer, principalmente quando conectado a reciclagem e a rotas com maior conteúdo de sucata. Em seguida, magnésio tende a avançar de forma mais abrangente (serão utilizados em peças onde a redução de massa compensa), mas com cuidado porque a cadeia global é concentrada e pode gerar risco de abastecimento e de preço, isso torna o material mais estratégico a longo prazo. A terceira tendência é a continuidade (e refinamento) do uso de aços avançados de alta resistência (AHSS e UHSS), já que as instalações atuais das siderúrgicas brasileiras são ativos de longa vida útil, com ciclos de operação e amortização que se estendem por décadas e assumindo também que tais ligas entregam segurança estrutural com boa relação custo x desempenho, além de terem uma agenda de descarbonização e modernização tecnológica (mais sucata, mais forno elétrico a arco, novas rotas). Por fim, titânio tende a crescer em nichos onde a conta fecha por requisito funcional (corrosão, confiabilidade, ambientes severos), mas no automotivo brasileiro deve ficar concentrado em aplicações específicas pelo custo e pela complexidade da cadeia.

6.3.1.2. Oportunidades

A maior oportunidade brasileira, olhando o longo prazo, é transformar vantagem estrutural em competitividade de custo: o país tem matriz elétrica relativamente mais renovável do que muitos concorrentes e pode usar isso para reduzir a pegada de carbono de metais processados localmente, principalmente quando combinado com reciclagem (alumínio) e maior uso de sucata (aço). Outra oportunidade é ligar a agenda de materiais à política industrial automotiva: o MOVER incentiva eficiência energética, inovação e descarbonização na cadeia automotiva, o que abre espaço para projetos de ligas e processos com foco em redução de massa, maior durabilidade e reciclabilidade. Além disso, a eletrificação aumenta a importância de metais funcionais (especialmente cobre para condução elétrica e térmica), e isso cria oportunidade para desenvolver soluções de projeto e processo (uniões, corrosão galvânica, dissipação térmica) que viabilizem plataformas mais eletrificadas com custo controlado.

6.3.1.3. Desafios

O principal desafio é que as ligas em destaque globalmente nem sempre são as que serão utilizadas no Brasil, porque o mercado é altamente sensível a custo total (material + processo + refugo + manutenção). Isso pressiona a adoção de magnésio e titânio em grande escala e puxa soluções que usem aço avançado e alumínio reciclado com engenharia inteligente (topologia, espessuras, tratamentos superficiais, projeto de junta). Outro desafio é cadeia de suprimentos: magnésio e alguns insumos críticos têm oferta global concentrada, o que expõe a indústria a volatilidade e risco geopolítico. Por fim, existe o desafio regulatório-tecnológico: padrões de emissões e eficiência no Brasil avançam (como o PROCONVE L8), e isso obriga consistência de engenharia e qualidade em escala, sem aumentar demais o custo do veículo.

6.3.1.4. Necessidades

Para o longo prazo “virar realidade” no Brasil, a necessidade mais prática é aumentar a capacidade de desenvolver e industrializar rotas e ligas com foco em custo: mais engenharia de aplicação (design-to-cost), mais domínio de união de materiais dissimilares, controle de corrosão, fadiga e variabilidade de processo. Em paralelo, é crítico fortalecer infraestrutura de P&D e demonstração industrial em temas que destravam adoção: soldagem e colagem estrutural, conformação e trincamento de borda em aços avançados, reciclagem com controle de impurezas (alumínio e aço), e qualificação de fornecedores para reduzir dependência externa nos materiais mais sensíveis. Por fim, como a eletrificação tende a puxar demanda por cobre e outros minerais críticos, o país precisa alinhar planejamento de cadeia (mineração, refino, transformação e manufatura) com a trajetória tecnológica do setor automotivo para evitar gargalos de oferta e custo.

7. Síntese do trabalho

O trabalho indica que a evolução de ligas metálicas no setor automotivo é puxada por duas forças simultâneas: lightweighting (redução de massa) e eletrificação, sob pressão crescente de ESG e regulamentações. No curto e médio prazo, o alumínio aparece como principal vetor de inovação (com forte concentração de depósitos), por combinar leveza, maturidade de processos e potencial de circularidade/reciclagem. Em paralelo, os aços avançados (AHSS/UHSS) permanecem como pilar estrutural e de segurança, com a agenda tecnológica cada vez mais centrada em processabilidade, soldabilidade e integridade das juntas (mitigando riscos como fragilizações e falhas associadas à fabricação). Materiais como magnésio, cobre, titânio e lítio avançam de forma complementar: Mg em aplicações seletivas de alto ganho de massa e funções específicas, Cu por demandas de condutividade e gestão térmica, Ti em nichos onde corrosão/ambientes severos justificam custo, e Li ligado a densidade de energia e segurança em baterias.

O ponto crítico transversal é que o veículo moderno é multi-material: sem domínio de união, controle de corrosão galvânica e validação robusta de durabilidade, muitas soluções não viram produto em escala. Para o Brasil, a síntese é pragmática: capturar competitividade exige evoluir o que já tem escala (aços e alumínio) e alinhar modernização industrial com a agenda de descarbonização – aumentando o uso de sucata, ampliando EAF onde fizer sentido e desenvolvendo novas rotas, sem perder a estabilidade metalúrgica exigida pela cadeia automotiva. Isso reforça a necessidade de infraestrutura aplicada (ensaios de corrosão, fadiga, impacto/crash e juntas), organização da cadeia de sucata/reciclagem com controle de impurezas e programas colaborativos de P&D para reduzir dispersão de processo, refugo e custo total.

Referências Bibliográficas

ARCELORMITTAL. ArcelorMittal é a segunda corporação que mais pratica inovação aberta no Brasil. 2025. Disponível em: https://brasil.arcelormittal.com/box_templates/NEWS/b1987270-72c7-450a-940a-781290164523. Acesso em: 19 fev. 2026.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL (CSN). Centro de pesquisa. Rio de Janeiro, 2026. Disponível em: <https://esg.csn.com.br/inovacao/centro-de-pesquisa/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; INSTITUTO AÇO BRASIL. A indústria do aço no Brasil. Brasília: CNI, 2017. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/04/a2/04a2a7ac-4a9f-4505-84a5-f4c54242ead7/aco_brasil.pdf. Acesso em: 19 fev. 2026.

DORNOFF, J. et al. Unwrapping the package: a review of the European Commission's CO2 standards proposal. Washington, DC: ICCT, 2025. Disponível em: <https://theicct.org/publication/european-commissions-risks-and-opportunities-of-the-proposed-co2-standards-dec25/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. Cars and vans - climate action. Bruxelas: European Commission, [s.d.]. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/road-transport/cars-and-vans_en. Acesso em: 19 fev. 2026.

FERNANDES, Patrícia Dias et al. Descarbonização na indústria siderúrgica: oportunidade para agregar valor e aumentar a competitividade. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 31, n. 60, ed. esp., p. 207-253, set. 2025.

GONÇALVES, Margarida; MONTEIRO, Helena; ITEN, Muriel. Life cycle assessment studies on lightweight materials for automotive applications: an overview. Energy Reports, v. 8, p. 338-345, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.067>. Acesso em: 19 fev. 2026.

HU, X.; FENG, Z. Advanced high-strength steel: basics and applications in the automotive industry. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, abr. 2021. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1813170>. Acesso em: 19 fev. 2026.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Dados do setor. Rio de Janeiro, [s.d.]. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/dados-do-setor/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. As well as aluminium recycling, saving 95% of the energy needed for primary aluminium production, the recycling process saves a similar percentage in greenhouse gas emissions. Disponível em: <https://international-aluminium.org/landing/as-well-as-aluminium-recycling-saving-95-of-the-energy-needed-for-primary-aluminium-production-the-recycling-process-saves-a-similar-percentage-in-greenhouse-gas-emissions/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). Lightweighting technology development and trends in U.S. passenger vehicles. Washington, DC: ICCT, 2016. Disponível em: <https://theicct.org/publication/lightweighting-technology-development-and-trends-in-u-s-passenger-vehicles/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV Outlook 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 19 fev. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Outlook for battery and energy demand. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-battery-and-energy-demand>. Acesso em: 19 fev. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Trends in electric vehicle batteries. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-batteries>. Acesso em: 19 fev. 2026.

MARTINSEN, K.; HU, S. J.; CARLSON, B. E. Joining of dissimilar materials. CIRP Annals, v. 64, n. 2, p. 679-699, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.006>. Acesso em: 19 fev. 2026.

NARLA, Anirudh et al. Real-driving emissions from Bharat Stage VI (phase 1) passenger cars and a light commercial vehicle in India: PEMS testing. Washington, DC: ICCT, jul. 2024. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/06/ID-123-%E2%80%93PEMS-India_wp_final.pdf. Acesso em: 19 fev. 2026.

REUTERS. Carbon emissions from aluminium sector dip despite output growth: report. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/carbon-emissions-aluminium-sector-dip-despite-output-growth-report-2024-02-28/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). Institutos de inovação: pesquisa aplicada e novas tecnologias. Brasília: SENAI, 2026. Disponível em: <https://www.senai.portaldaindustria.com.br/institucional/institutos-de-inovacao/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

TAN, Wei et al. The effects of service temperature on the fatigue behavior of a polyurethane adhesive joint. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 107, p. 102819, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102819>. Acesso em: 19 fev. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2024/1257, de 24 de abril de 2024. Jornal Oficial da União Europeia, 2024. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/vehicle-emissions-and-battery-durability-euro-7-technical-requirements-and-certification-rules.html>. Acesso em: 19 fev. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Vehicle emissions and battery durability (Euro 7): technical requirements and certification rules. Luxemburgo: EUR-Lex, 2025. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/vehicle-emissions-and-battery-durability-euro-7-technical-requirements-and-certification-rules.html>. Acesso em: 19 fev. 2026.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UNECE). Euro 7: UN transposition plan. Genebra: UNECE, 2024. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2024-10/GRPE-91-24e.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2026.

UNITED STATES. Department of Energy (DOE). Quadrennial technology review 2015: lightweight automotive materials. Washington, DC, 2015. Disponível em: <https://www.energy.gov/documents/qtr2015-8d-lightweight-automotive-materialspdf>. Acesso em: 19 fev. 2026.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency (EPA). Multi-pollutant emissions standards for model years 2027 and later light-duty and medium-duty vehicles. Federal Register, Washington, DC, v. 89, n. 76, p. 27784-28328, 18 abr. 2024. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2024/04/18/2024-06214/multi-pollutant-emissions-standards-for-model-years-2027-and-later-light-duty-and-medium-duty>. Acesso em: 19 fev. 2026.

USIMINAS. Centro de pesquisa da Usiminas completa 50 anos de pesquisa e desenvolvimento do aço. 2021. Disponível em: <https://www.usiminas.com/releases/centro-de-pesquisa-da-usiminas-completa-50-anos-de-pesquisa-e-desenvolvimento-do-aco/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

VOLCOVICI, V.; SHEPARDSON, D. Trump revokes basis of US climate regulation, ends vehicle emission standards. Reuters, Washington, 12 fev. 2026. Disponível em: <https://www.reuters.com/legal/litigation/trump-administration-set-revoke-basis-us-climate-regulation-2026-02-12/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Life cycle inventory (LCI) study report: 2021 data release. Bruxelas: World Steel Association, 2022. Disponível em: <https://worldsteel.org/media/publications/life-cycle-inventory-study-report-2021-data-release/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Steel and raw materials. 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023-1.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2026.

POLÍMEROS



| Sumário

1. Introdução	142
2. Visão geral global – Contextualização	143
3. Análise Específica do Brasil	154
4. Arranjo por Horizontes de Inovação	161
5. Considerações Finais e Recomendações	170
Glossário	173
Referências Bibliográficas	182

1. Introdução

Este estudo foi elaborado sob demanda da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA) com o objetivo de constituir um guia sistemático das tecnologias, inovações e tendências relacionadas à utilização de polímeros no setor automotivo. A análise considera informações, dados e referências disponíveis até janeiro de 2026, refletindo o estado do conhecimento e do contexto tecnológico, regulatório e de mercado vigente até esse período.

O caderno Polímeros avalia o cenário global e nacional dos materiais estratégicos e dos polímeros críticos utilizados no setor automotivo, contemplando aspectos tecnológicos, regulatórios, econômicos e de inovação. A estrutura do trabalho foi organizada de modo a proporcionar uma compreensão integrada das tendências internacionais, das particularidades do contexto brasileiro

O **Capítulo 1** - Visão Geral Global apresenta a contextualização internacional do tema, abordando o panorama mundial dos materiais estratégicos e dos polímeros críticos, as principais tendências e frentes de pesquisa emergentes, bem como referências internacionais relevantes. O **Capítulo 2** - Análise Específica do Brasil examina o contexto nacional, com foco na cadeia brasileira de polímeros e materiais automotivos, na competitividade tecnológica e no nível de maturidade das soluções existentes. São discutidos os principais gargalos em pesquisa, inovação e infraestrutura, o ecossistema nacional de inovação, o ambiente regulatório e as políticas públicas, além de uma matriz de oportunidades e riscos para o país. O **Capítulo 3** - Arranjo em Horizontes de Inovação organiza as perspectivas de desenvolvimento tecnológico nos horizontes de curto, médio e longo prazos, identificando tendências, oportunidades, desafios e necessidades em cada período. Por fim, o **Capítulo 4** - Considerações Finais e Recomendações sintetiza os principais resultados do estudo e propõe direcionamentos estratégicos para a tomada de decisão e o fortalecimento da competitividade nacional no setor polimérico automotivo.

Espera-se que este material sirva como referência técnica para a formulação de políticas, o direcionamento de investimentos e o fortalecimento das atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, tanto no âmbito industrial quanto acadêmico.

2. Visão geral global – Contextualização

2.1. Panorama Mundial: Materiais Estratégicos e Polímeros Críticos

A indústria automotiva global atravessa uma transformação estrutural impulsionada pela convergência entre descarbonização, eletrificação da frota e digitalização do veículo. Os polímeros surgem nesse contexto não apenas como materiais de redução de massa, mas como habilitadores funcionais que integram funções elétricas, térmicas, eletromagnéticas e estruturais em plataformas de crescente complexidade. Três forças convergentes moldam a demanda e o papel dos polímeros na mobilidade: a pressão regulatória e de mercado por descarbonização e economia circular; a pressão por eficiência produtiva, redução de massa e integração funcional; e as transformações tecnológicas do veículo, que abrangem a eletrificação, os sistemas ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) e os novos conceitos de arquitetura veicular.

As projeções estratégicas para a próxima década indicam que o mercado global de plásticos automotivos passará por uma expansão consistente, saindo de um valor estimado em US\$ 36 bilhões em 2025 para aproximadamente US\$ 55 bilhões até 2035. Esse crescimento é impulsionado pela substituição sistemática de metais por polímeros em componentes estruturais e de acabamento, visando atender às regulamentações de eficiência de combustível e descarbonização. Segundo o relatório Global EV Outlook 2025 da Agência Internacional de Energia (IEA), as vendas globais de veículos elétricos continuam em trajetória acelerada, com projeção de que, até 2030, quase um em cada três automóveis em circulação na China seja elétrico, e um em cada cinco na União Europeia e nos Estados Unidos. Esse cenário impõe uma revisão profunda nos requisitos técnicos dos materiais, criando demanda por polímeros capazes de suportar tensões elétricas elevadas, dissipar calor eficientemente e contribuir para a redução da massa total do sistema.

Paralelamente, a crescente pressão por circularidade, refletida em regulamentos como o End-of-Life Vehicle (ELV) Regulation revisado pela Comissão Europeia e a Battery Regulation da UE (Regulamento (EU) 2023/1542), exige que o ecodesign seja incorporado desde a concepção do produto, contemplando reciclabilidade, rastreabilidade e conteúdo de material pós-consumo (PCR). Além disso, crescem os requisitos por revestimentos multifuncionais, com proteção anticorrosiva, resistência térmica e blindagem eletromagnética, e adesivos avançados, estruturais e de vedação, que substituem soldas e fixações mecânicas, ampliando a liberdade de design.

Macrotendência	Requisitos de Material	Classes Poliméricas Relevantes	Horizonte
Eletrificação da Frota	Resistência térmica, isolamento elétrico, retardância à chama (UL V0), condutividade térmica controlada, estabilidade dimensional	PPS, PPA, PA46, PEEK, LCP, TCPs com BN/AlN, intumescentes	Curto
Redução de Peso (Lightweighting)	Alta relação resistência/massa, rigidez específica elevada, integração funcional	CFRP, GFRP, LFT, organosheet, PA/CF, PP/NF, compósitos sanduíche	Curto
ADAS e Conectividade V2X	Baixa constante dielétrica ($\epsilon_r \sim 2,5-3,5$), perda tangencial mínima ($\tan \delta < 0,002$), estabilidade dimensional	PP modificado, PPO, PPS, LCP, COC/COP, compósitos de baixa polaridade	Curto
Sustentabilidade e Economia Circular	Conteúdo renovável/reciclado, reciclabilidade, baixo PCF, biocompatibilidade ambiental	PA11, PA1010 biobased, bio-PTT, PLA reforçado, PEF, materiais PCR	Médio
Baterias de Estado Sólido	Condutividade iônica elevada, estabilidade eletroquímica, supressão de dendritos, processabilidade	SPEs (PEO-LiTFSI), GPEs, nanocompósitos polímero-cerâmica, PVDF-HFP copolímeros	Médio

Tabela 1 – Macrotendências e Requisitos de Materiais Poliméricos

2.2. Principais Tendências Globais e Frentes de Pesquisa Emergentes

2.2.1. Polímeros de Alta Performance

A substituição sistemática de metais por polímeros de engenharia e compósitos estruturais avança em todas as arquiteturas veiculares. Materiais como PEEK (poliéter-éter-cetona), PEI (polieterimida), PPA (poliftalamida) e PA46 apresentam estabilidade em temperaturas de operação acima de 200 °C, compatibilidade com fluidos automotivos e resistência mecânica para aplicações sob o capô e em eletrônica de potência. No mesmo contexto, polímeros e compósitos com condutividade térmica elevada assumem papel estratégico na gestão térmica de sistemas de baterias e eletrônica de potência.

Compósitos poliméricos carregados com partículas cerâmicas como nitreto de boro (BN) e nitreto de alumínio (AlN), grafeno ou fibras de carbono permitem elevar a condutividade térmica de valores típicos de $\sim 0,2$ W/m·K para faixas entre 1 e 10 W/m·K, mantendo baixa densidade e processabilidade adequada aos equipamentos tradicionais de transformação. Empresas como BASF (Ultramid® TC), SABIC (LNP™ Thermocomp) e Lanxess (Durethan® BTC) desenvolvem soluções comerciais aplicadas em carcaças de módulos de bateria, dissipadores e conectores de alta potência. Materiais de interface térmica (TIMs) poliméricos, em forma de géis, pads ou adesivos, oferecem melhor conformabilidade e menor resistência térmica de contato em relação às soluções metálicas tradicionais. Sistemas baseados em materiais de mudança de fase (PCMs) encapsulados em matrizes poliméricas viabilizam gestão térmica passiva em módulos de bateria por absorção de calor latente.

Polímeros intrinsecamente condutores (ICPs), como a polianilina (PAni), o PEDOT:PSS, o polipirrol (PPy) e politiofenos, e compósitos com nanotubos de carbono (CNTs) e grafeno apresentam taxas de crescimento superiores a 15% ao ano até 2030 no mercado automotivo. As aplicações incluem blindagem EMI/RFI, antenas integradas em para-brisas e retrovisores, sensores piezoresistivos e capacitivos integrados em componentes estruturais, além da substituição de conectores metálicos por trilhas condutoras poliméricas em sistemas de baixa corrente. Empresas como Heraeus e Agfa-Gevaert comercializam tintas condutoras baseadas em PEDOT para eletrônica impressa, enquanto Arkema e Cabot Corporation desenvolvem compósitos condutores com CNT e grafeno para aplicações automotivas. avançados, estruturais e de vedação, que substituem soldas e fixações mecânicas, ampliando a liberdade de design.

2.2.2. Materiais Sustentáveis: Biobased e Reciclados

O portfólio de biopolímeros de engenharia expandiu-se de forma significativa nos últimos anos. Poliamidas biobased como PA11, PA1010 e PA56, derivadas de óleo de rícino ou fontes vegetais, já são utilizadas em linhas de combustível, tubulações, conectores e fibras técnicas por montadoras como Ford e Mercedes-Benz, com desempenho compatível ao das versões petroquímicas. O bio-PTT (politrimetileno tereftalato parcialmente biobased), produzido a partir de 1,3-propanodiol de origem renovável, é utilizado em grades de ventilação, tapetes, painéis internos e para-sóis em modelos Toyota e Nissan. O PLA (poliácido láctico), que representa aproximadamente 40% do mercado de polímeros biodegradáveis, vem sendo combinado com fibras naturais (linho, coco, kenaf, curauá, palha de trigo) e modificações químicas para ampliar sua aplicação em painéis, carpetes e componentes internos. Sua viabilidade prática é demonstrada pelo uso em modelos da Mazda, Toyota e Ford.

Plataformas emergentes ampliam o portfólio de materiais sustentáveis: o cardanol (CNSL) atua como precursor fenólico para resinas epóxi e fenólicas de elevada estabilidade térmica e resistência química, explorado comercialmente pela Cardolite; a lignina técnica, subproduto da indústria de celulose, apresenta potencial de substituição parcial de resinas fósseis, sendo desenvolvida por empresas como a Suzano; e o PEF (polietileno furanoato), desenvolvido pela Origin Materials, apresenta propriedades superiores de barreira e maior Tg em relação ao PET convencional. Empresas como Arkema oferecem a linha Rilsan® PA11 de fonte renovável e o PEBAX® Rnew®, enquanto a BASF disponibiliza TPU obtido parcialmente de fontes renováveis (Elastollan® N) e poliamidas de fonte renovável (Ultramid® Biomass Balance) ou reciclagem química (Ultramid® Ccycled™). A adoção de materiais reciclados, incluindo conteúdo pós-consumo (PCR), intensifica-se por exigências regulatórias, metas corporativas de sustentabilidade e demandas de mercado, sem prejuízo às propriedades mecânicas, térmicas e de desempenho requeridas para aplicações técnicas.



No campo de tintas e adesivos sustentáveis, observa-se o desenvolvimento de sistemas base água, alto teor de sólidos, UV/EB e powder coatings como alternativas aos sistemas solvente-base, em resposta direta a legislações de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) como REACH, EPA e China VI. Em adesivos, cresce a substituição de fixações mecânicas por colagens estruturais e semiestruturais com produtos de origem biobased ou recicláveis, como epóxi de óleos vegetais e PU de polióis renováveis.

2.2.3. Polímeros Funcionais para Baterias e Eletrônica Embarcada

No ecossistema de baterias de íons de lítio e baterias de estado sólido, os polímeros assumem funções ativas nestes sistemas. Eletrólitos poliméricos sólidos (SPEs) e em gel (GPEs), em desenvolvimento por Toyota, BMW, Samsung SDI, LG Energy Solution e Solid Power, visam maior estabilidade térmica, supressão de dendritos e compatibilidade com ânodos de lítio metálico. Nanocompósitos híbridos polímero-cerâmica elevam a condutividade iônica e a janela eletroquímica de operação. Ligantes poliméricos funcionais substituem o PVDF inerte em eletrodos, incluindo sistemas processáveis em água sem NMP, polímeros biobased (BASF, Arkema, Solvay) e ligantes que acomodam a expansão volumétrica do silício em ânodos de alta capacidade. Desenvolve-se também crescente interesse em polímeros redox-ativos e eletrodos orgânicos como alternativa parcial a materiais críticos como Co e Ni, visando reduzir a dependência de metais estratégicos.

O conceito de baterias estruturais (structural batteries) representa uma inovação no design automotivo ao integrar funções energéticas e mecânicas em um único componente. Nesses materiais, laminados de CFRP utilizam fibras de carbono simultaneamente como reforço mecânico e eletrodo (ânodo), enquanto matrizes poliméricas atuam como eletrólitos sólidos ou suportes para eletrólitos gelificados. Montadoras como Volvo e institutos como o IFP Energies Nouvelles e a Universidade Chalmers desenvolvem programas ativos nessa área, com potencial de aumento de autonomia estimado entre 30 e 70 km por redistribuição energética na estrutura.

A evolução das interfaces homem-máquina (HMI) no setor automotivo, com displays OLED curvos, superfícies táteis integradas e head-up displays avançados, exige substratos poliméricos com alta estabilidade térmica, transparência óptica e compatibilidade com eletrônica orgânica e impressa. A poliimida (PI) permanece como material de referência com T_g acima de 300 °C, sendo amplamente utilizada por fabricantes como Samsung Display e LG Display em painéis automotivos flexíveis. Polímeros como polietileno naftalato (PEN) e ciclo-olefinas (COC/COP) surgem como alternativas de custo intermediário, sendo críticos para encapsulamento de OLEDs e óptica de sensores LiDAR. Para sistemas ADAS, polímeros com transparência eletromagnética controlada são essenciais para radomes e housings de radar (24-77 GHz) e comunicação V2X (~5,9 GHz), sendo atendidos por materiais como polipropileno modificado, PPO e compostos de baixa polaridade. Polímeros como PPS e LCP são amplamente utilizados em componentes de sensores ópticos e de radar devido ao baixo coeficiente de expansão térmica (CTE), alta estabilidade dimensional e resistência térmica.

2.2.4. Polímeros Funcionais para Baterias e Eletrônica Embarcada

A manufatura aditiva de polímeros e compósitos consolidou-se como tecnologia complementar aos processos convencionais, aplicada à produção de peças complexas, personalizadas e de baixo volume. Tecnologias como SLA, SLS, FDM, LOM e inkjet estão difundidas, enquanto avanços em automação e seleção de materiais impulsionam a transição da prototipagem para séries limitadas. Em particular, a técnica FFF com fibras contínuas (Markforged, Anisoprint) viabiliza componentes estruturais leves com elevado desempenho mecânico. Os processos ATL (Automated Tape Laying) e AFP (Automated Fiber Placement), dominados por fornecedores como Toray Industries e Hexcel Corporation, permitem a deposição automatizada de tapes ou fibras pré-impregnadas com elevada precisão, sendo utilizados em painéis estruturais e componentes de alto desempenho por montadoras como BMW e Lamborghini. O processo SLS com PA12, PA11 biobased, PEEK e compósitos reforçados com fibra de carbono viabiliza a produção de peças com propriedades isotrópicas e elimina o ferramental metálico, permitindo a produção sob demanda de peças de reposição.

O processo IME (In-Mold Electronics) representa uma ruptura na integração de eletrônica em superfícies plásticas: circuitos impressos com tintas condutoras são integrados diretamente em peças moldadas por injeção, eliminando etapas de montagem e reduzindo massa. Fornecedores Tier 1 como Forvia e Continental avançam na adoção de IME em smart surfaces, painéis de instrumentos e superfícies de HMI de veículos da próxima geração. Sensores e unidades de controle demandam materiais com propriedades de integridade eletromagnética controlada, motivando pesquisas em revestimentos funcionais e polímeros com cargas condutivas como grafeno, grafite e compósitos metálicos. A digitalização do setor tem influenciado também o design de peças e componentes poliméricos, adicionando complexidade geométrica e eficiência material.

2.2.5. Materials Informatics e Digitalização de Materiais

A convergência entre aprendizado de máquina, bancos de dados de materiais (NOMAD, Materials Project, ICSD) e técnicas de design computacional, denominados coletivamente Materials Informatics, acelera o ciclo de descoberta de novas aplicações e otimização de polímeros. Plataformas como PolymerGenome (Georgia Tech) e ferramentas preditivas de Tg, condutividade térmica e propriedades dielétricas permitem a triagem virtual de milhares de copolímeros antes da síntese laboratorial. Gêmeos digitais (digital twins) de processos de injeção e extrusão otimizam parâmetros em tempo real, reduzindo defeitos e desperdício de material.

Tabela 2 – Linhas de Pesquisa Emergentes: Nível de Maturidade (TRL) e Horizonte de Impacto

Linha de Pesquisa	TRL Global	TRL Brasil	Horizonte	Principais Agentes
Eletrólitos poliméricos sólidos (SPE/GPE)	TRL 4-6	TRL 2-3	Médio/Longo	Toyota, Solid Power, Samsung SDI
Baterias estruturais (structural batteries)	TRL 3-5	TRL 1-2	Longo	Volvo, IFP Energies Nouvelles, Chalmers
Vitrímeros e polímeros autorreparáveis	TRL 5-7	TRL 3-4	Longo	Mallinda, Wevo, CNRS, Solvay

IME (In-Mold Electronics)	TRL 7-8	TRL 4-5	Curto/Médio	Forvia, Continental, TactoTek
TCPs (Polímeros Termicamente Condutivos)	TRL 7-9	TRL 5-6	Curto	BASF, SABIC, Lanxess, Covestro
Biocompósitos com fibras naturais (estruturais)	TRL 6-	TRL 6-7	Curto/Médio	BMW, Daimler, Fraunhofer ICT
Materials Informatics (ML/IA para materiais)	TRL 4-6	TRL 2-4	Médio/Longo	Georgia Tech, MIT, Citrine Informatics
Reciclagem química (pirólise, solvólise, enzimática)	TRL 5-8	TRL 3-5	Médio	Carbios, Covestro, Agilyx, BASF

2.3. Principais Players Globais

A liderança tecnológica no setor de polímeros automotivos é exercida por um ecossistema integrado que envolve desde grandes petroquímicas até OEMs. No segmento de petroquímicas, BASF, Arkema, Solvay/Syensqo e SABIC atuam como provedores de ciência de materiais, desenvolvendo resinas de alta performance e aditivos para as novas exigências de segurança térmica e sustentabilidade. A Arkema, por exemplo, oferece a linha Rilsan® (PA11 de óleo de rícino) e a Rilsan® HT (poli(tal)amida para substituição de metais), além do PEBAX® Rnew® (elastômero em bloco parcialmente biobased). A BASF mantém o portfólio Ultramid® com versões de fonte renovável e reciclagem química, além de TPU parcialmente renovável (Elastollan® N). A Solvay/Syensqo oferece PEEK (KetaSpire®), PPSU (Radel®) e PPA (Amodel®), enquanto a SABIC desenvolve TCPs (LNP™ Thermocomp) e compostos para radomes (Noryl™ PPO). A Covestro atua em TPU (Desmopan®), policarbonato biobased e reciclagem química de PU.

A transposição dessas matérias-primas para sistemas veiculares funcionais ocorre por meio dos fornecedores Tier 1, como Magna, Continental e Forvia, que integram funções utilizando processos avançados como IME e módulos de bateria com polímeros funcionais para gestão térmica. Na extremidade final da cadeia, as OEMs estabelecem o ritmo de adoção. BMW emprega estruturas CFRP nos modelos i4, i5 e iX, além de biocompósitos com fibras naturais. A Mercedes-Benz utiliza a poliamida renovável EcoPaXX® (PA410) em tampas de motor. A Toyota incorpora biopoliésteres, bioPET e blendas de PLA em acabamentos internos do Prius e SAI, além de desenvolver plataformas baseadas em eletrólitos sólidos para próximas gerações de EVs. A Renault adotou o DURABIO™, policarbonato parcialmente biobased da Mitsubishi Chemicals.

Os principais centros de excelência que sustentam essa inovação incluem a Associação de Institutos Fraunhofer (Alemanha), com competências em biopolímeros, compósitos e manufatura aditiva; o IACMI (EUA) em compósitos de baixo custo e automação; o AIMPLAS (Espanha), com mais de 50 plantas piloto para processamento de polímeros e compósitos; o WMG - Warwick Manufacturing Group (Reino Unido) em mobilidade sustentável; e o ITENE (Espanha) e ACM (Austrália) em circularidade e novos materiais. Esses centros desenvolvem protocolos de teste e validação que fundamentam a padronização internacional de materiais emergentes.

2.4. Regulamentos Internacionais e Impacto na Adoção Tecnológica

2.4.1. Normas técnicas de referência

A padronização técnica internacional viabiliza a substituição de materiais tradicionais por polímeros avançados com segurança e previsibilidade. No contexto da eletromobilidade, a norma UL 94, com o grau V-0 exigindo auto extinção da chama em poucos segundos e ausência de gotejamento inflamável, tornou-se referência adotada pelas montadoras e na norma UL 2580 para componentes de baterias, conectores de alta voltagem e eletrônica de inversores. Isso impulsiona a pesquisa em aditivos retardantes de chama livres de halogênios, compatíveis com a reciclagem e sem degradação das propriedades mecânicas e reológicas do polímero base.

As normas SAE J definem protocolos para testes de envelhecimento térmico, resistência química a fluidos automotivos e resistência ao impacto em baixas temperaturas, sendo fundamentais para a homologação de novos biocompósitos. As normas ISO, como a ISO 26262 para segurança funcional, exercem influência direta na seleção de materiais para ADAS, exigindo estabilidade dimensional de polímeros em suportes de radares e câmeras sob variações térmicas extremas. As normas FMVSS/UNECE, por sua vez, impulsionam o desenvolvimento de formulações de retardantes de chama com menor emissão de fumaça e toxicidade controlada.

2.4.2. Requisitos Ambientais Regulatórios

A sustentabilidade ambiental tornou-se requisito de homologação tão relevante quanto o desempenho mecânico. O controle da pegada de carbono do produto (Product Carbon Footprint - PCF) exige que a indústria de polímeros monitore as emissões desde a extração da matéria-prima, o que levou as OEMs a priorizarem polímeros biobased ou com alto conteúdo reciclado para reduzir o impacto ambiental incorporado nos veículos elétricos. A conformidade com o regulamento REACH atua como filtro para a inovação em materiais, restringindo substâncias perigosas como estabilizantes e retardantes de chama halogenados e impondo a reformulação de matrizes poliméricas. A presença de aditivos restritos em peças antigas impede o reaproveitamento como matéria-prima reciclada de qualidade, gerando o chamado “legado químico”.

O regulamento ELV (revisado pela Comissão Europeia) propõe que 25% do plástico utilizado na fabricação de um veículo novo seja obrigatoriamente proveniente de fontes recicladas, sendo parte desse percentual específica de materiais recuperados de outros automóveis. Essa mudança regulatória obriga as montadoras a revisarem soluções de design que empregam adesivos ou sobreinjeções de materiais incompatíveis, que inviabilizam a separação técnica dos polímeros no estágio de desmontagem. A Battery Regulation da UE (2023/1542) institui o Passaporte Digital de Baterias, que exige registro detalhado de todos os materiais constituintes, incluindo polímeros de proteção e isolamento, ao longo de todo o ciclo de vida. Observa-se ainda uma convergência entre normas de gestão de resíduos eletroeletrônicos e regulamentações automotivas, impulsionando o desenvolvimento de polímeros quimicamente recicláveis que permitam a recuperação de metais preciosos e minerais críticos sem contaminar o fluxo de resíduos poliméricos.

3. Análise Específica do Brasil

O Brasil ocupa posição de destaque como o oitavo maior mercado automotivo mundial, com cadeia produtiva estruturada e presença consolidada de multinacionais e petroquímicas nacionais relevantes. A transição para materiais avançados, contudo, expõe fragilidades sistêmicas que precisam ser superadas para que o país capitalize as oportunidades da mobilidade sustentável.

3.1. Panorama da Cadeia Brasileira de Polímeros Automotivos

3.1.1. Fornecedores e estrutura da cadeia

A cadeia brasileira é composta por uma combinação de produtores globais, fabricantes nacionais e distribuidores técnicos. Multinacionais como LyondellBasell, BASF, Solvay/Syensqo, SABIC, RadiciGroup, Lanxess, Covestro e Celanese atuam no Brasil fornecendo polímeros de engenharia, especialidades e compostos de alto desempenho. A Braskem ocupa posição dominante na produção nacional de poliolefinas (PP, PE, PVC), com capacidade superior a 8 milhões de toneladas por ano e produção comercial de polietileno verde (100% renovável, ~200 kt/ano) desde 2010. Outras petroquímicas relevantes no contexto nacional incluem Unipar, Oxiteno, Elekeiroz, Innova, Nitro Química e Petrom, que fornecem químicos básicos, intermediários e especialidades utilizados na fabricação, modificação e processamento de polímeros (plastificantes, aditivos e intermediários funcionais).

No segmento de elastômeros termoplásticos (TPEs), que engloba as classes TPE-S (SBS, SEBS), TPE-O (TPO/PP-EPDM), TPE-U (TPU), TPE-E (COPE/TPC-ET), TPE-A (PEBA) e TPE-V ou TPV (PP+EPDM vulcanizado), o mercado é dominado por multinacionais como Celanese, Avient, LyondellBasell e TeknorApex, com atuação nacional de Karina Plásticos, FCC e Petropol. O Brasil possui ainda cadeia de tintas automotivas com fornecedores globais (AkzoNobel, BASF Coatings, Axalta) integrados a centros técnicos próximos às plantas das OEMs. Em adesivos estruturais, a dependência de tecnologias importadas é mais acentuada, especialmente para aplicações de alto desempenho em EVs. Distribuidores técnicos desempenham papel estratégico ao conectar produtores globais e nacionais aos transformadores automotivos, oferecendo suporte na seleção de materiais e nos processos de homologação.

3.1.2. Estrutura Tier 1 - Tier 2 e integração OEM

As OEMs estabelecem os requisitos globais de homologação e as diretrizes de sustentabilidade que orientam a seleção de materiais para novas plataformas. Centros de engenharia locais no Brasil possuem autonomia para adaptar especificações técnicas à realidade climática e de infraestrutura do país. Os fornecedores Tier 1, como Magna, Continental, Forvia, Valeo, Marcopolo, Mahle e lochpe-Maxion, são os principais transformadores e integradores, traduzindo demandas em componentes funcionais e recorrendo a fornecedores Tier 2 para compostos poliméricos, masterbatches e componentes plásticos menores. O Tier 2 assume função estratégica ao oferecer especialidades químicas e serviços de customização, e sua eficiência depende de comunicação fluida com os níveis superiores da cadeia. A integração entre esses níveis é frequentemente acelerada por programas governamentais e consórcios setoriais que buscam elevar o índice de conteúdo local e a eficiência produtiva.

3.2. Competitividade Tecnológica e Nível de Maturidade (TRL)

O cenário tecnológico brasileiro de polímeros para o setor automotivo apresenta perfil de maturidade heterogêneo. Tecnologias consolidadas como poliolefinas commodities, sistemas de tintas base água e primers anticorrosivos operam em escala industrial (TRL 9). Tecnologias emergentes voltadas à mobilidade sustentável apresentam níveis de maturidade intermediários ou baixos. O uso de biopolímeros técnicos e biocompósitos reforçados com fibras naturais situa-se majoritariamente entre TRL 6 e TRL 7. Inovações disruptivas como formulações com polímeros de engenharia avançados e materiais compósitos estruturais encontram-se em estágios entre TRL 4 e 5, com pesquisas ativas em institutos nacionais, mas dependência de fornecedores externos que dificulta sua implementação no setor.

Para tintas e adesivos, persiste dependência de pigmentos e aditivos importados, com lacunas em processos UV/EB, tintas funcionais avançadas e adesivos estruturais de alta performance. O avanço do setor esbarra em infraestrutura laboratorial limitada para homologação de tintas funcionais e adesivos biobased, com gargalos específicos em ensaios de segurança térmica, testes de fogo e validação multimaterial.

Tecnologia / Material	TRL Brasil	TRL Global	Gargalo Principal	Oportunidade
Poliolefinas (PP, PE) - escala industrial	TRL 9	TRL 9	Concentração em Braskem; diferenciação técnica limitada	Polietileno verde em escala comercial
Tintas base água e sistemas anticorrosivos	TRL 8-	TRL 9	Dependência de pigmentos e aditivos importados	Conformidade antecipada com regulação de VOC

Biopolímeros técnicos (PA11, bio-PTT)	TRL 6-7	TRL 8-9	Ausência de fornecedores nacionais; custo 20-30% acima	Biomassa abundante (cana, rícino, fibras naturais)
Compósitos com fibras naturais (interiores)	TRL 6-7	TRL 7-8	Variabilidade das fibras; padronização técnica	Sisal, curauá, juta disponíveis em escala
CFRP / compósitos estruturais de alto desempenho	TRL 4-5	TRL 7-9	Sem produção nacional de fibra de carbono; importação onerosa	Parcerias com Tier 1 globais para desenvolvimento
Polímeros para gestão térmica (TCPs)	TRL 5-6	TRL 7-9	Ausência de laboratórios acreditados para ensaios de bateria	Demanda crescente de montadoras de EVs (BYD, GWM)
Reciclagem química (pirólise, solvólise)	TRL 3-4	TRL 5-7	Ausência de plantas piloto; logística reversa inadequada	Programa MOVER e agenda ESG das OEMs

Fonte: Elaboração própria (2026).

A evolução da maturidade tecnológica no Brasil tem sido impulsionada por programas de fomento que buscam elevar o TRL das inovações locais por meio da colaboração entre institutos de pesquisa, universidades e indústria. Iniciativas como a EMBRAPII, com suas unidades especializadas em polímeros (ISI e IPT), e os programas setoriais Rota 2030 e MOVER têm promovido o desenvolvimento de soluções pré-competitivas e a validação em ambiente industrial. No entanto, a transição para TRLs mais elevados ainda enfrenta gargalos relacionados à infraestrutura de plantas piloto, financiamento para escalonamento e ciclos longos de validação pelas montadoras.

3.3. Ecossistema Nacional de Inovação

O Brasil dispõe de um ecossistema diversificado de players voltados ao apoio à indústria automotiva no desenvolvimento tecnológico e na inovação. As universidades, especialmente UFRGS, USP, Unicamp e UFSCar, possuem competências consolidadas em polímeros, compósitos com fibras naturais e nanocristais de celulose, atuando predominantemente em TRLs iniciais com pesquisa básica e aplicada. Alguns programas de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais já operam em TRLs intermediários, aproximando-se das demandas industriais.

Os Institutos SENAI de Inovação e o IPT atuam em TRLs intermediários (5-7), com infraestrutura e modelo de atuação voltados ao desenvolvimento e à transferência de conhecimento para o setor produtivo, desempenhando papel análogo ao dos institutos Fraunhofer na Alemanha. A EMBRAPII financia projetos de P&D com modelo de cofinanciamento tripartite (empresa/EMBRAPII/governo), reduzindo o risco tecnológico e financeiro dos projetos. Os programas setoriais Rota 2030 (R\$ 1,5 bilhão comprometidos para P&D automotivo) e MOVER (com foco em mobilidade verde e inovação), articulados com a Lei do Bem, a Nova Indústria Brasil, e as linhas de financiamento da FINEP e do BNDES, criam condições para que as empresas invistam em P&D com redução significativa do risco. O investimento nacional em P&D situa-se em aproximadamente 1,2% do PIB (2024), com meta de elevação para 2%, ainda distante dos níveis praticados por países de alta intensidade tecnológica.

No âmbito das startups e ambientes de inovação, o ecossistema brasileiro registrou crescimento no número de empresas voltadas à digitalização, inteligência artificial, ciência de dados e novos modelos de serviços. As startups de base tecnológica profunda (deeptech), especialmente aquelas voltadas a novos materiais, química verde, eletrificação e manufatura avançada, ainda são escassas e concentradas no estado de São Paulo. Cresce o número de startups com foco em sustentabilidade, atuando em gestão de resíduos, avaliação de ciclo de vida (ACV), descarbonização e compliance ambiental. Hubs e parques tecnológicos como o Instituto Caldeira (Rio Grande do Sul), o Sapiens Parque (Santa Catarina) e o Cubo Itaú (São Paulo) funcionam como catalisadores regionais de inovação, conectando empresas automotivas, fornecedores, startups e projetos colaborativos. Há ainda o potencial de colaboração com países como Alemanha, Canadá e China, com parcerias internacionais que podem acelerar a transferência de tecnologia e o desenvolvimento de capacidades nacionais.

3.4. Gargalos Tecnológicos e Estruturais

Um dos gargalos mais críticos encontra-se na transição entre a escala laboratorial (TRL 3-4) e a produção industrial (TRL 8-9). A infraestrutura de plantas piloto para validação em escala semi-industrial é escassa e concentrada. Ao contrário de referências internacionais como o AIMPLAS, que conta com mais de 50 plantas piloto para processamento de polímeros e compósitos, o Brasil carece dessa infraestrutura, forçando empresas a realizarem validações no exterior ou a assumirem riscos elevados ao escalar diretamente para produção. Esse “vale da morte” da inovação retarda os ciclos de desenvolvimento e encarece a criação de novos materiais.

A dependência de importações constitui outra vulnerabilidade estrutural. Entre janeiro e junho de 2025, o Brasil importou aproximadamente US\$ 1,8 bilhão em polímeros, correspondentes a 1,43 milhão de toneladas, com concentração de 88% do valor em cinco estados industrializados. A elevação das tarifas de importação de polímeros de 12,6% para 20%, aliada a medidas antidumping sobre PP, PE e PVC, visa proteger a indústria nacional, mas reduz a flexibilidade de abastecimento em momentos de escassez interna. A carga tributária total sobre importação de materiais e equipamentos pode superar 50% (II, IPI, PIS/COFINS-Importação e ICMS), criando desvantagem competitiva para empresas que necessitam de insumos não produzidos nacionalmente.

A qualificação de novos polímeros ou compósitos para uso automotivo pode levar de 2 a 5 anos, envolvendo estágios de caracterização completa do material, testes de envelhecimento acelerado, análise de ciclo de vida, validação em componentes protótipo e homologação final em produção. A certificação IATF 16949 requer de 12 a 24 meses de implementação e investimento substancial para pequenas e médias empresas. A fragmentação entre pesquisa acadêmica, desenvolvimento industrial e produção em escala constitui um desafio sistêmico, com baixa sinergia entre universidades, institutos de pesquisa aplicada e fornecedores de matérias-primas.

Ensaaios críticos como caracterização reológica avançada, análise de ciclo de vida, segurança térmica de baterias, EMI/EMC e reciclabilidade frequentemente dependem de laboratórios internacionais. Na logística, problemas estruturais nos portos brasileiros geram prejuízos anuais estimados em R\$ 21 bilhões, afetando a importação de insumos químicos e polímeros. Eventos como a seca na Amazônia em 2024 evidenciaram a fragilidade do abastecimento via Zona Franca de Manaus. Infraestrutura limitada para reciclagem química e descomissionamento de veículos compromete a capacidade nacional de atender às metas internacionais de conteúdo reciclado pós-consumo.

3.5. Oportunidades Estratégicas para o Brasil

A principal vantagem competitiva estrutural do Brasil reside na abundância de biomassa agroindustrial. O país está entre os maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar e dispõe de grandes volumes de fibras naturais como sisal, juta, curauá e coco, além de acesso a rícino e lignina de celulose. Essa disponibilidade posiciona o país como potencial produtor de biopolímeros e biocompósitos automotivos, com estudos indicando reduções de até 70% nas emissões de CO₂ em comparação a plásticos convencionais. A Braskem já produz polietileno verde (200 kt/ano), quimicamente idêntico ao convencional, e a rede de universidades e centros de pesquisa nacionais apresenta competências em compósitos com fibras naturais e nanocristais de celulose.

A entrada de montadoras chinesas como BYD e GWM, que estabelecerão plantas no Brasil entre 2025 e 2026, gera uma janela estratégica para a qualificação de fornecedores locais de polímeros técnicos para baterias, gestão térmica e componentes estruturais. O mercado automotivo brasileiro, com sua escala e presença consolidada de multinacionais, favorece o desenvolvimento conjunto de soluções customizadas e a internalização de competências tecnológicas. Metas globais de conteúdo reciclado (ELV 25%, ESG Escopo 3) criam demanda por polímeros PCR de qualidade automotiva, e o Brasil, com geração de resíduos plásticos superior a 11 Mt/ano, pode estruturar uma cadeia de reciclagem avançada de alto valor agregado, especialmente em PP e PA pós-industrial e pós-consumo. Adesivos estruturais para arquiteturas multimaterial também representam oportunidade de desenvolvimento local de alto valor agregado, substituindo soldas e fixações mecânicas em carrocerias.

3.6. Cenários de Curto, Médio e Longo Prazo

No horizonte imediato, a tendência no Brasil aponta para o fortalecimento da produção de polímeros commodities e a ampliação do uso de biopolímeros em aplicações não estruturais. A eletrificação avançará gradualmente, com veículos a combustão e híbridos flex ainda dominando o mercado (mais de 70% das vendas). Analistas projetam que em 2026 modelos 100% elétricos ficarão 20% mais baratos, com marcas como BYD, GWM, Renault, Toyota e Volkswagen planejando fábricas no Brasil. Polímeros técnicos continuarão dependentes de importação, enquanto o programa MOVER impulsionará P&D de forma incremental.

Entre 2028 e 2030, a eletrificação se acelerará, com projeção de 1,4 milhão de veículos elétricos em circulação no Brasil até 2030, representando cerca de 2,35% da frota. Essa transição demandará polímeros de alto desempenho para componentes de baterias, isolamento térmico e redução de peso. Biocompósitos com fibras naturais deverão alcançar TRL 8-9 em aplicações interiores. Novos players chineses pressionarão fornecedores brasileiros a elevar padrões de qualidade e certificação.

Até 2040, veículos elétricos devem representar 55% das vendas de veículos novos no Brasil, segundo projeções da McKinsey. Polímeros de alto desempenho tornar-se-ão críticos para componentes estruturais leves que compensem o peso das baterias e atendam aos requisitos de segurança e performance. Em termos de economia circular, tende-se à implementação de regulamentações de reciclabilidade e conteúdo reciclado mínimo. O Brasil poderá liderar globalmente em biopolímeros automotivos se investir em escalonamento industrial e homologação internacional, aproveitando a estrutura do agronegócio nacional para o desenvolvimento e a produção de materiais sustentáveis.

4. Arranjo por Horizontes de Inovação

A estruturação por horizontes temporais permite alinhar estratégias de investimento e desenvolvimento às dinâmicas de maturidade tecnológica e às pressões regulatórias e de mercado em cada período. Cada horizonte é analisado sob seis dimensões: tendências, oportunidades, desafios, estruturas necessárias, capital intelectual e conexões estratégicas.

4.1. Horizonte de Curto Prazo (0-3 anos | 2025-2027)

4.1.1. Tendências

No horizonte de curto prazo, a adoção de soluções sustentáveis deve ser impulsionada pela otimização de materiais já disponíveis comercialmente, com foco em biopolímeros de fácil acesso, polímeros parcialmente renováveis e reciclagem mecânica convencional. A transição não envolve mudanças disruptivas, mas a substituição gradual de materiais petroquímicos por alternativas de menor impacto ambiental compatíveis com a infraestrutura produtiva existente. A reciclagem mecânica permanece como eixo principal das estratégias de curto prazo, com crescente uso de PP, PE, PET e PA reciclados pós-industrial e pós-consumo em componentes internos. O avanço de compatibilizantes, antioxidantes, estabilizadores UV e cargas orgânicas e inorgânicas permite manter propriedades ao longo de múltiplos ciclos de processamento, abrindo espaço para compostos estáveis entre resinas virgens e recicladas.

Os compósitos sustentáveis de primeira geração, reforçados com fibras naturais curtas ou médias como madeira, cânhamo, sisal, curauá e palha de trigo, permitem reduzir o percentual de resina petroquímica e utilizar biomassas abundantes e de baixo custo, com propriedades adequadas para elementos de acabamento interno, painéis de porta e suportes estruturais de baixa solicitação, integrando-se diretamente em processos convencionais de injeção. Os elastômeros termoplásticos (TPEs) avançam na substituição de borrachas vulcanizadas em vedações, mantas e peças de acabamento, com maior reciclabilidade e eficiência produtiva. No segmento de tintas, a transição para sistemas de baixo VOC (base água, alto teor de sólidos e powder coatings) acompanha o alinhamento antecipado a REACH e EPA, enquanto revestimentos funcionais anticorrosivos e retardantes crescem com a demanda de EVs.

A integração de processos híbridos, combinando moldagem por injeção com tecnologias de compósitos, consolida-se como rota para estruturas leves em alto volume. O processo de organosheet overmolding (estampagem de laminados termoplásticos pré-consolidados PA/GF ou PP/CF, seguida de sobreinjeção) é aplicado por montadoras como a Volkswagen em componentes semiestruturais. O processo LFT-D (Long Fiber Thermoplastic - Direct) permite o compounding in-line de fibras longas (25-100 mm) com matrizes termoplásticas diretamente na etapa de moldagem, reduzindo degradação das fibras e eliminando a etapa de pelletização, sendo amplamente utilizado por fornecedores Tier 1 como Faurecia e Magna International em módulos de assento e estruturas de painel. O HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding) permite a produção de compósitos estruturais de fibra de carbono com tempos de ciclo entre 1 e 3 minutos, empregado por BMW e Lamborghini em componentes estruturais de alto desempenho. O CCM (Continuous Compression Molding) viabiliza a produção em larga escala de biocompósitos com fibras naturais em matrizes termoplásticas.

4.1.2. Oportunidades

A substituição de ligas metálicas pesadas por termoplásticos reforçados e compósitos com fibras naturais em peças de média solicitação mecânica constitui a via mais rápida para ganhos de eficiência energética, reduzindo o consumo de combustível em motores a combustão e estendendo a autonomia em EVs e híbridos. A conformidade antecipada com metas de economia circular e regulação de Escopo 3 oferece vantagem competitiva para fornecedores que dominam o uso de plásticos reciclados pós-consumo em componentes visíveis, preparando a cadeia de suprimentos para futuras pressões fiscais. A qualificação de fornecedores nacionais para as montadoras chinesas (BYD, GWM) que instalarão fábricas no Brasil em 2025-2026 abre oportunidades imediatas, ao lado do desenvolvimento de adesivos estruturais nacionais para arquiteturas multimaterial.

4.1.3. Desafios

O custo dos materiais sustentáveis constitui o principal entrave: polímeros PCR de grau automotivo frequentemente apresentam valores iguais ou superiores ao material virgem, em razão das etapas adicionais de coleta, triagem, descontaminação e reprocessamento. O processo de homologação com ciclos de 2 a 5 anos e o conservadorismo técnico das OEMs frente a materiais sem histórico robusto de uso restringem a velocidade de adoção. A complexidade dos resíduos gerados no descomissionamento de automóveis, com resíduos mistos e compósitos de difícil separação, representa um gargalo para a economia circular. A variabilidade inerente aos reciclados, com contaminação cruzada e degradação térmica e oxidativa durante o reprocessamento, dificulta a padronização para aplicações estruturais e estéticas.

4.1.4. Estruturas necessárias e capital intelectual

A viabilidade da indústria brasileira no curto prazo depende da ampliação da capacidade produtiva para processar compostos poliméricos sustentáveis, com atualização tecnológica nas unidades de extrusão e injeção para lidar com a variabilidade de propriedades de reciclados e biocompósitos. O fortalecimento de laboratórios nacionais acreditados para ensaios de inflamabilidade (UL 94, ISO 5660) e durabilidade (SAE J) é prioritário para reduzir a dependência de certificações internacionais. O setor demanda especialistas com domínio em reologia de formulações complexas, metrologia aplicada e ferramentas CAD/CAE para simulação reológica e estrutural. A adoção de modelos de inovação aberta e equipes multidisciplinares, conectando petroquímicas, ICTs/EMBRAPII, universidades e Tier 1, é fundamental para integrar novos materiais desde a prototipagem.

4.2. Horizonte de Médio Prazo (3-5 anos | 2028-2030)

4.2.1. Tendências

No horizonte de médio prazo, biopolímeros de alto desempenho como PLA modificado, bio-PTT, poliamidas biobased e poliuretanos derivados de polióis vegetais devem consolidar-se como substitutos diretos de polímeros petroquímicos em peças internas, painéis, revestimentos e têxteis automotivos, mantendo compatibilidade com processos de injeção, extrusão, termoformagem e espumação. A reciclagem química de primeira geração ganha escala, com a glicólise e hidrólise de PU (Covestro), a despolimerização enzimática de PET (Carbios, TRL 7-8) e as tecnologias de CO₂ supercrítico para recuperação de fibras de carbono. Estratégias de circularidade de primeira geração, baseadas na integração entre resinas recicladas mecanicamente e polímeros biobased, consolidam-se como soluções tecnicamente viáveis e economicamente competitivas.

Compósitos avançados biobased, com fibras naturais tratadas (mercerização, silanos) ou híbridas combinadas com matrizes biobased (PLA, PA11), ampliam aplicações para componentes semiestruturais, atingindo rigidez específica e resistência mecânica adequadas a módulos de painel e suportes de bateria. No contexto da eletrificação avançada, polímeros funcionais para EVs ganham destaque: TCPs com dupla função (condutividade térmica e isolamento elétrico), PCMs encapsulados em módulos de bateria e adesivos estruturais com função de TIM (Thermal Interface Material).

4.2.2. Oportunidades

O crescimento do mercado de EVs e veículos comerciais leves abre espaço para a integração de funções e a substituição de componentes metálicos por compósitos poliméricos. Biocompósitos brasileiros com sisal e curauá, ao atingirem TRL 8-9 em aplicações interiores, podem gerar oportunidades de exportação de know-how e componentes para OEMs globais com metas ESG. A expansão da infraestrutura de recarga pública (meta de 10 mil pontos até 2030) cria demanda por polímeros resistentes a intempéries, UV e EMI em equipamentos de recarga. Parcerias de desenvolvimento entre petroquímicas nacionais e Tier 1 globais para materiais de gestão térmica de baterias aproveitam a vantagem competitiva da biomassa nacional.

4.2.3. Desafios

O custo tecnológico do escalonamento industrial representa o principal obstáculo: processos como pirólise e solvólise requerem CAPEX elevado e demandam redução de 40 a 50% no custo-base via design-to-value para atingir paridade com resinas virgens petroquímicas fósseis. A logística reversa e a triagem automatizada para alimentar plantas de reciclagem química ainda estão em estágio inicial no Brasil, com volume e qualidade de resíduo insuficientes para operação em escala. A harmonização normativa de novos protocolos de impacto, fadiga e segurança contra incêndio para compósitos híbridos, compatíveis com regulações de Veículos Inteligentes e Conectados (ICV), representa um desafio regulatório de médio prazo. A ausência de hubs integradores de materiais automotivos, que atuariam como centros físicos e digitais articulando montadoras, institutos e fornecedores, mantém o desenvolvimento fragmentado e dependente da importação de módulos plásticos inteligentes.

4.2.4. Estruturas necessárias, capital intelectual e conexões

O Brasil necessita de centros de testes nacionais para baterias e componentes de alta voltagem, com capacidade para ensaios de fuga térmica, EMI/EMC e compatibilidade de polímeros com eletrólitos, eliminando a dependência de certificações exclusivamente internacionais. A adoção de simulação avançada de materiais integrada ao ciclo de design, com modelagem multiescala de compósitos e polímeros antes da prototipagem física, reduz custo e tempo de desenvolvimento. Linhas de produção flexíveis e modulares, com troca rápida de grades de materiais e integração de componentes eletrônicos via IME, são essenciais para séries menores de EVs e veículos comerciais leves. O capital intelectual demandará profissionais especializados em moldagem por RTM e LFT, sobreinjeção bicomponente, polímeros funcionais para alta voltagem e metrologia de precisão em dielétricos. Parcerias com centros internacionais como Fraunhofer, IACMI e AIMPLAS, e participação em consórcios de desenvolvimento de padrões globais para ICVs, são condições para reduzir a curva de aprendizado em reciclagem química e compósitos de alto desempenho.

4.3. Horizonte de Longo Prazo (5-10 anos | 2030-2035)

4.3.1. Tendências

No horizonte de longo prazo, polímeros funcionais inteligentes devem redefinir o papel dos materiais poliméricos no setor automotivo, incorporando respostas ativas a estímulos como temperatura, deformação mecânica, campos elétricos e sinais químicos. Esses materiais viabilizam funções integradas de sensoriamento, monitoramento estrutural e adaptação funcional ao longo do ciclo de vida do veículo. A tecnologia IME deverá evoluir de aplicações de interface homem-máquina para sistemas eletrônicos multifuncionais incorporados diretamente ao componente estrutural, reduzindo o número de peças, a massa total e as etapas de montagem. Associado a essa evolução, princípios de ecodesign tornam-se fundamentais, orientando o desenvolvimento de componentes para desmontagem, reutilização, reciclagem e extensão da vida útil desde a concepção.

Vitrímeros, materiais termofixos com ligações covalentes dinâmicas que combinam resistência mecânica e térmica com reprocessabilidade, permitem soldagem, reparo e reciclagem de compósitos sem degradação significativa. No setor automotivo, destacam-se aplicações em CFRP recicláveis, junção térmica de componentes e reparo in situ. Empresas como Mallinda e Wevo já oferecem soluções comerciais com propriedades típicas de engenharia ($E > 3 \text{ GPa}$, $T_g > 120 \text{ °C}$), em nível de maturidade TRL 5-7, com expectativa de adoção estrutural mais ampla entre 2028 e 2032. Polímeros self-healing, baseados em mecanismos intrínsecos como ligações reversíveis Diels-Alder e dissulfetos, ou extrínsecos como microcápsulas com agentes de cura, permitem a recuperação parcial ou total de propriedades após dano. Aplicações comerciais em revestimentos automotivos autorreparáveis (PPG, Nissan) já atingem TRL 8-9, enquanto aplicações estruturais encontram-se em TRL 4-6. Polímeros responsivos a estímulos, incluindo desenvolvimentos do MIT sobre materiais que dobram a condutividade térmica sob deformação mecânica de forma rápida e reversível, abrem perspectivas para sistemas adaptativos de dissipação térmica e segurança passiva em baterias e eletrônica embarcada, ainda em TRL 3-5.

As baterias estruturais atingirão maior maturidade nesse horizonte, com programas ativos na Volvo, no IFP Energies Nouvelles e na Universidade Chalmers projetando potencial de redução substancial de massa e aumento de autonomia. O ecodesign integrado e o passaporte digital de materiais, exigido pela regulação da UE a partir de 2026-2027, estabelecerão a rastreabilidade digital como requisito de mercado.

As plataformas de Materials Informatics com ML/IA para triagem virtual de copolímeros e otimização de formulações devem tornar-se ferramentas de rotina industrial, reduzindo ciclos de P&D de anos para semanas.

4.3.2. Oportunidades

O ecodesign torna-se eixo central para a transformação das arquiteturas automotivas, orientando o desenvolvimento de veículos concebidos desde o projeto para minimizar impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida. A adoção de princípios como design para desmontagem, reparabilidade, reutilização e reciclagem favorecem arquiteturas com menor diversidade de materiais incompatíveis, viabilizando estratégias de economia circular. A incorporação de métricas de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV/LCA) desde as etapas iniciais de desenvolvimento torna o ecodesign uma ferramenta estratégica que alinha inovação em materiais, eficiência produtiva e metas globais de descarbonização. O potencial de liderança global do Brasil em biopolímeros automotivos biobased, com investimento estratégico em escalonamento industrial e homologação internacional, representa a oportunidade mais relevante do horizonte de longo prazo. O desenvolvimento em parceria com potências tecnológicas na UE e China pode transformar o Brasil de receptor para desenvolvedor de tecnologia.

4.3.3. Desafios e Lacunas

A adoção do ecodesign em tecnologias de longo prazo é limitada pela ausência de normatização específica para compósitos multifuncionais e sistemas integrados, gerando insegurança regulatória. A falta de políticas industriais de longo prazo representa um obstáculo sistêmico: inovações como vitrímeros e IME exigem ciclos de desenvolvimento que ultrapassam horizontes governamentais típicos, demandando suporte estatal contínuo que transcenda incentivos fiscais pontuais. A baixa integração com as cadeias globais de valor, refletida na desconexão entre padrões técnicos brasileiros e exigências internacionais de rastreabilidade digital, como o passaporte de materiais, pode isolar fornecedores Tier 2 nacionais de projetos de OEMs globais. Sem uma estratégia de inserção internacional, as inovações brasileiras correm o risco de permanecer limitadas ao mercado interno.

4.3.4. Estruturas, capital intelectual e conexões

A soberania tecnológica brasileira em polímeros avançados exigirá Centros de Excelência em Nanotecnologia e Materiais Funcionais integrados a sistemas de inteligência artificial para a descoberta acelerada de polímeros, operando como polos multidisciplinares capazes de desenvolver polímeros com autorreparação e condutividade térmica controlada. Plantas demonstrativas de Economia Circular 4.0, equipadas com robótica avançada para a separação automatizada de compósitos e sistemas de reciclagem química de ciclo fechado, permitirão testar a viabilidade de modelos regenerativos antes da implementação massiva. O capital intelectual demandará cientistas de materiais avançados (polímeros inteligentes e compósitos multifuncionais), especialistas em digitalização de materiais (digital twins, ACV, LCA) e designers de arquitetura multimaterial. A integração plena em ecossistemas internacionais de inovação, com redes de P&D bilaterais e financiamento de projetos de alto risco em polímeros autorreparáveis e sistemas autônomos, é condição para o posicionamento competitivo do Brasil no longo prazo.

Tabela 4 – Síntese Comparativa dos Horizontes de Inovação

Dimensão	Curto Prazo (0-3 a)	Médio Prazo (3-5 a)	Longo Prazo (5-10 a)
Materiais Foco	PP/PE reciclados, biocompósitos naturais, TPEs, LFT, tintas low-VOC	Biopolímeros de engenharia, compósitos avançados, TCPs, SPE/GPE	Vitrímeros, baterias estruturais, IME multifuncional, polímeros inteligentes

Processos	Injeção convencional, organosheet, LFT-D, HP-RTM	RTM avançado, AFP/ATL, pirólise piloto, manufatura aditiva semi-industrial	Fabricação aditiva de precisão, economia circular 4.0, AM integrada a IME
Regulação Motriz	ESG Escopo 3, REACH, VOC, IATF 16949, MOVER	ELV 25% PCR, Battery Regulation EU, ISO 26262 ICV	Passaporte digital de materiais, metas net-zero 2050, LCA obrigatória
Infraestrutura Crítica	Laboratórios acreditados UL/SAE, linhas piloto de mistura	Centros de testes para baterias, plantas de reciclagem química demonstrativa	Centros de IA/Materials Informatics, plantas de EC 4.0, hubs de desmonte
Capital Intelectual	Formuladores, especialistas CAD/CAE, especialistas em reologia	Engenheiros de compósitos, especialistas RTM/AFP, técnicos em baterias	Cientistas de materiais avançados, engenheiros de LCA, especialistas em ML/IA
Oportunidade Brasil	Qualificação de fornecedores para EVs chineses; fibras naturais	Escalonamento de biocompósitos; primeiras plantas de reciclagem química	Liderança global em biopolímeros; desenvolvimento em conjunto com P&D internacional

Fonte: Elaboração própria (2026).

5. Considerações Finais e Recomendações

5.1. Síntese das Principais Oportunidades

O panorama tecnológico dos polímeros no setor automotivo revela múltiplas oportunidades estratégicas para inovação e competitividade. A crescente demanda por polímeros sustentáveis e materiais reciclados, incluindo conteúdo pós-consumo (PCR), abre espaço para soluções que conciliem leveza, desempenho e economia circular. O avanço de compósitos e TPEs permite redução de peso, integração funcional e maior eficiência energética, atendendo às exigências de veículos elétricos e sistemas ADAS. A eletrificação veicular e a incorporação de sensores, blindagens eletromagnéticas e baterias de alta capacidade criam demanda por polímeros com resistência térmica, estabilidade dimensional, propriedades EMI/RFI e condutividade térmica controlada. A digitalização de processos (manufatura aditiva, simulação e controle inteligente de qualidade) representa oportunidade para acelerar o desenvolvimento de novos materiais e otimizar a produção com maior eficiência e rastreabilidade. A liderança potencial em biopolímeros automotivos biobased e a qualificação de fornecedores nacionais para as OEMs chinesas que instalarão plantas no Brasil constituem as oportunidades de maior impacto no curto e médio prazo.

5.2. Considerações Finais e Recomendações

A baixa maturidade nacional em desenvolvimento e processamento de polímeros de engenharia e compósitos avançados limita a competitividade e a capacidade de inovação local. A dependência estrutural de importações, cerca de US\$ 1,8 bilhão em polímeros por semestre, expõe a cadeia a vulnerabilidades cambiais, geopolíticas e de frete internacional. A ausência de infraestrutura de plantas piloto para escalamento constitui a principal causa do “vale da morte” da inovação nacional. A defasagem tecnológica crescente frente a centros globais, particularmente em polímeros para EVs, soluções funcionais para ADAS e processos de reciclagem química, pode impactar o tempo de chegada ao mercado de novas tecnologias e a competitividade dos fornecedores nacionais. A falta de políticas industriais de longo prazo, com imprevisibilidade regulatória e fiscal, desestimula investimentos em P&D de alto risco e longa maturação.

5.3. Direcionamentos Estratégicos

5.3.1. Para P&D

Os investimentos devem ser concentrados em biopolímeros e biocompósitos de alto desempenho, aproveitando a vantagem competitiva estrutural da biomassa nacional. É necessário estruturar laboratórios e linhas piloto para polímeros funcionais (TCPs, polímeros dielétricos, retardantes de chama livres de halogênios), com acreditação para ensaios de bateria e segurança elétrica. A integração de ferramentas de Materials Informatics ao ciclo de desenvolvimento, em parceria com Georgia Tech, MIT e centros europeus, e o desenvolvimento de protocolos nacionais de ACV/LCA alinhados a normas ISO 14040/14044 são ações prioritárias para a evolução tecnológica do setor.

5.3.2. Para Investimentos

As plantas piloto de reciclagem química (pirólise e solvólise) devem ser priorizadas em regiões com alta geração de resíduos plásticos industriais, em modelo de parceria público-privada com BNDES e FINEP. A criação de fundos setoriais específicos para materiais automotivos avançados, análogos ao modelo de financiamento de startups de deeptech da Fraunhofer-Gesellschaft, impulsionaria inovações de alto risco. O incentivo à certificação IATF 16949 de PMEs nacionais, por meio de programas subsidiados no âmbito do MOVER, reduziria a barreira de entrada na cadeia de fornecimento. Investimentos em infraestrutura portuária e logística reversa reduziram o custo sistêmico de importação de especialidades e o custo de coleta de resíduos para reciclagem.

5.3.3. Para Parcerias

Os acordos de cooperação tecnológica com Fraunhofer (Alemanha), IACMI (EUA) e AIMPLAS (Espanha) devem ser ampliados com foco em transferência de tecnologia de compósitos avançados e reciclagem química. Consórcios de P&D com OEMs chinesas instaladas no Brasil, voltados ao desenvolvimento em parceria de materiais locais para EVs, devem substituir o modelo atual de fornecedor de commodities por um de desenvolvedor tecnológico. O fortalecimento das conexões entre ICTs, EMBRAPPII e grandes petroquímicas como Braskem, BASF e Arkema deve viabilizar projetos de TRL 5-8 em biopolímeros técnicos e economia circular. A criação de hubs regionais de inovação especializados em materiais avançados para mobilidade, conectando startups de deeptech, universidades e Tier 1, à semelhança do Instituto Caldeira e do Cubo Itaú, consolidaria o ecossistema nacional de inovação em materiais.

5.4. Proposta de Roadmap Tecnológico

O roteiro estratégico proposto estrutura-se em três fases ao longo do período 2025-2035. A Fase 1 - Consolidação e Qualificação (2025-2027) compreende a qualificação de fornecedores nacionais para EVs de montadoras chinesas, a acreditação de laboratórios para ensaios UL 94 e de bateria, a expansão de capacidade em LFT e organosheet, programas de formação técnica em reologia e CAE, e as primeiras plantas piloto de biocompósitos em parceria ICTs/EMBRAPII.

A Fase 2 - Escalonamento e Diferenciação (2028-2030) abrange plantas demonstrativas de reciclagem química (pirólise e solvólise), biopolímeros técnicos em TRL 8-9 para interiores automotivos, centros de testes para baterias e EMI/EMC, implementação de Materials Informatics em institutos de pesquisa e os primeiros componentes nacionais de TCPs para baterias em série.

A Fase 3 - Liderança e Inovação Disruptiva (2031-2035) contempla a consolidação do Brasil como exportador de know-how em biopolímeros automotivos, a adoção de vitrímeros e materiais autorreparáveis em aplicações estruturais, a implantação de hubs de Economia Circular 4.0 com desmonte automatizado, o desenvolvimento para baterias estruturais com parceiros europeus e asiáticos, e a integração plena de LCA e passaporte digital de materiais na cadeia produtiva nacional.

“Implementar novas tendências em polímeros é um ato de decisão estratégica: exige coragem para abandonar a rigidez do passado e abraçar a resiliência moldável de um futuro que não apenas transporta pessoas, mas sustenta a vida.”

6. Glossário

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Entidade representativa do setor plástico brasileiro, que publica dados de mercado e indicadores setoriais.

ACV / LCA - Avaliação do Ciclo de Vida / Life Cycle Assessment. Metodologia para quantificação dos impactos ambientais de um produto ao longo de todas as etapas de sua existência, da extração de matéria-prima ao descarte.

ADAS - Advanced Driver Assistance Systems (Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor). Conjunto de tecnologias eletrônicas embarcadas que auxiliam o motorista em tarefas de direção, percepção do ambiente e prevenção de colisões.

AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. Entidade técnico-científica brasileira voltada ao desenvolvimento da engenharia no setor automotivo.

AFP - Automated Fiber Placement (Colocação Automatizada de Fibras). Processo de manufatura de compósitos que utiliza cabeçotes robóticos para depositar fibras pré-impregnadas com alta precisão e repetibilidade.

AIMPLAS - Instituto Tecnológico del Plástico. Centro de pesquisa espanhol especializado em processamento de polímeros e compósitos, com mais de 50 plantas piloto.

AIN - Nitreto de Alumínio. Carga cerâmica utilizada em compósitos poliméricos para elevar a condutividade térmica mantendo o isolamento elétrico.

AM - Additive Manufacturing (Manufatura Aditiva). Conjunto de processos que fabricam peças pela adição sucessiva de material camada por camada, a partir de modelos digitais.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Entidade que representa as montadoras instaladas no Brasil e publica o anuário setorial anual.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Órgão regulatório brasileiro responsável pela segurança sanitária de produtos e serviços.

ATL - Automated Tape Laying (Laminação Automatizada de Fitas). Processo de manufatura de compósitos que deposita fitas pré-impregnadas de forma automatizada em superfícies planas ou levemente curvas.

ATP - Associação de Terminais Portuários Privados. Entidade que representa os terminais portuários privados instalados no Brasil, e publica anuário setorial semestral.

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Agência federal brasileira responsável pela avaliação e financiamento da pós-graduação stricto sensu.

CAPEX - Capital Expenditure (Despesas de Capital). Investimentos em ativos fixos, equipamentos e infraestrutura produtiva.

CASE - Acrônimo para Conectividade (Connectivity), Autonomia (Autonomy), Compartilhamento (Sharing) e Eletrificação (Electrification). Denominação das quatro tendências transformadoras da indústria automotiva global.

CCM - Continuous Compression Molding (Moldagem por Compressão Contínua). Processo contínuo de conformação de compósitos termoplásticos com fibras naturais ou sintéticas em matrizes termoplásticas.

CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono). Compósito de alta resistência específica e rigidez, amplamente utilizado em componentes estruturais e semiestruturais de veículos premium e elétricos.

CNSL - Cashew Nut Shell Liquid (Líquido da Casca de Caju / Cardanol). Subproduto agroindustrial da castanha de caju, rico em fenóis insaturados, utilizado como precursor biobased de resinas epóxi e fenólicas.

CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique. Principal organismo público de pesquisa científica da França.

CNT - Carbon Nanotube (Nanotubo de Carbono). Nanomaterial alótropo do carbono com excelentes propriedades elétricas, mecânicas e térmicas, utilizado como carga funcional em compósitos poliméricos.

COC / COP - Cyclic Olefin Copolymer / Cyclic Olefin Polymer (Copolímero/Polímero de Olefina Cíclica). Classe de polímeros amorfo-transparentes com baixa birrefringência e excelente barreira a umidade, críticos para óptica de sensores LiDAR e encapsulamento de OLEDs.

CTE - Coefficient of Thermal Expansion (Coeficiente de Expansão Térmica). Parâmetro que quantifica a variação dimensional de um material por unidade de variação de temperatura.

EC - Economia Circular. Modelo econômico que busca manter o valor de materiais e produtos em ciclos fechados, minimizando resíduos e o consumo de recursos primários.

EMI/RFI - Interferência Eletromagnética / Interferência de Radiofrequência. Conjunto de interferências geradas por emissões eletromagnéticas em diferentes faixas de frequência.

EPA - Environmental Protection Agency. Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, que estabelece regulamentações sobre emissões de poluentes e VOCs.

ESG - Environmental, Social, Governance. Conjunto de critérios ambientais, sociais e de governança corporativa utilizados para avaliar a sustentabilidade das organizações.

ELV - End-of-Life Vehicle Regulation (Regulamento de Veículos em Fim de Vida). Regulamento europeu que estabelece requisitos para a gestão de veículos ao final de sua vida útil, incluindo metas de reciclagem e conteúdo reciclado.

EV - Electric Vehicle (Veículo Elétrico). Veículo propulsado exclusivamente por motor elétrico alimentado por baterias.

FDM - Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição Fundida). Processo de manufatura aditiva que extrusa filamentos termoplásticos fundidos para construção de peças camada a camada.

FDCA - Furandicarboxylic Acid (Ácido Furanodicarboxílico). Monômero biobased derivado do HMF, precursor do PEF.

FFF - Fused Filament Fabrication (Fabricação por Filamento Fundido). Processo de manufatura aditiva similar ao FDM, com capacidade de processar fibras contínuas como reforço estrutural (Markforged, Anisoprint).

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos. Agência pública brasileira de fomento à inovação tecnológica, vinculada ao MCTI.

FMVSS - Federal Motor Vehicle Safety Standards. Normas federais americanas de segurança para veículos automotores.

GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro). Compósito de menor custo que o CFRP, amplamente utilizado em peças estruturais e semiestruturais de médio desempenho.

GPE - Gel Polymer Electrolyte (Eletrólito Polimérico em Gel). Eletrólito intermediário entre líquido e sólido, com boa condutividade iônica e melhores propriedades de segurança em relação aos eletrólitos líquidos.

GWM - Great Wall Motor. Montadora chinesa de veículos, incluindo elétricos e SUVs, com expansão planejada para o Brasil.

HMF - Hydroxymethylfurfural (Hidroximetilfurfural). Composto intermediário biobased derivado da frutose, precursor do FDCA e, portanto, do PEF.

HMI - Human-Machine Interface (Interface Homem-Máquina). Sistema de interação entre o usuário e o veículo, incluindo painéis digitais, telas sensíveis ao toque e displays de cabeça erguida (HUD).

HP-RTM - High Pressure Resin Transfer Molding (Moldagem por Transferência de Resina sob Alta Pressão). Processo de fabricação de compósitos estruturais de fibra de carbono com ciclos de 1 a 3 minutos, utilizado por BMW e Lamborghini.

IA - Inteligência Artificial. Ramo da ciência da computação dedicado ao desenvolvimento de sistemas capazes de executar tarefas que requerem inteligência humana, incluindo aprendizado e tomada de decisão.

IACMI - Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation. Instituto americano dedicado ao desenvolvimento de tecnologias de compósitos de baixo custo e alta eficiência energética.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Órgão executor das políticas de meio ambiente no Brasil.

ICP - Intrinsically Conducting Polymer (Polímero Intrinsecamente Condutor). Classe de polímeros com cadeia conjugada que apresenta condutividade elétrica ajustável por dopagem química ou eletroquímica.

ICT - Instituição de Ciência e Tecnologia. Denominação legal brasileira para organizações que realizam pesquisa científica e tecnológica, incluindo universidades, institutos públicos e privados.

ICV - Intelligent Connected Vehicle (Veículo Inteligente e Conectado). Veículo equipado com sistemas avançados de sensores, processamento de dados e conectividade para comunicação V2X e operação autônoma.

IEA - International Energy Agency (Agência Internacional de Energia). Organização intergovernamental que analisa tendências energéticas globais e publica relatórios como o Global EV Outlook.

IME - In-Mold Electronics (Eletrônica Dentro do Molde). Tecnologia que integra circuitos impressos com tintas condutoras diretamente em peças plásticas moldadas por injeção, eliminando etapas de montagem.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Órgão brasileiro responsável pela metrologia científica e industrial e pela acreditação de laboratórios de ensaio.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Instituto de pesquisa aplicada vinculado ao governo do estado de São Paulo, com atuação em polímeros, compósitos e materiais automotivos.

ISO - International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização). Entidade que desenvolve normas técnicas internacionais, incluindo ISO 26262 (segurança funcional) e ISO 14040/14044 (ACV).

ITENE - Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística. Centro de pesquisa espanhol com competências em circularidade de materiais e novos materiais de embalagem.

LCA - ver ACV.

LCP - Liquid Crystal Polymer (Polímero de Cristal Líquido). Polímero de engenharia com baixo CTE, alta estabilidade dimensional e resistência térmica, utilizado em componentes de sensores ópticos e de radar.

LFT - Long Fiber Thermoplastics (Termoplásticos de Fibras Longas). Compósito termoplástico reforçado com fibras de comprimento entre 10 e 50 mm, que combina elevada resistência mecânica e boa processabilidade por injeção ou compressão.

LFT-D - Long Fiber Thermoplastic - Direct (Termoplástico de Fibras Longas - Direto). Variante do processo LFT que realiza o compounding in-line na etapa de moldagem, reduzindo a degradação das fibras e eliminando a pelletização.

LiTFSI - Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide. Sal de lítio amplamente utilizado em eletrólitos poliméricos sólidos (SPE) por sua alta dissociação iônica e estabilidade eletroquímica.

LOM - Laminated Object Manufacturing. Processo de manufatura aditiva que constrói peças pela laminação e corte sucessivos de folhas de material.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Ministério federal brasileiro responsável pela formulação de políticas de ciência, tecnologia e inovação.

MIMO - Multiple Input Multiple Output. Tecnologia de comunicação sem fio que utiliza múltiplas antenas transmissoras e receptoras para aumentar a capacidade de transmissão.

MIT - Massachusetts Institute of Technology. Instituto de tecnologia e pesquisa de referência mundial, com desenvolvimentos em Materials Informatics e polímeros responsivos.

ML - Machine Learning (Aprendizado de Máquina). Subcampo da Inteligência Artificial que desenvolve algoritmos capazes de aprender padrões a partir de dados, com aplicações em Materials Informatics.

MOVER - Programa Mobilidade Verde e Inovação (Lei nº 14.902/2024). Programa federal brasileiro de incentivo à inovação, sustentabilidade e eletrificação no setor automotivo.

NMP - N-Methyl-2-pyrrolidone (N-Metil-2-pirrolidona). Solvente utilizado no processamento de eletrodos de baterias com ligantes à base de PVDF; substitutos aquosos são buscados por razões ambientais.

NOMAD - Novel Materials Discovery. Banco de dados europeu de cálculos de ciência de materiais, parte do ecossistema de Materials Informatics.

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD em inglês). Organização internacional que publica análises econômicas e setoriais, incluindo sobre o futuro da indústria automotiva.

OEM - Original Equipment Manufacturer (Fabricante de Equipamento Original). Denominação das montadoras de veículos e principais fabricantes que estabelecem os requisitos técnicos e de homologação para a cadeia de fornecimento.

OLED - Organic Light Emitting Diode (Diodo Orgânico Emissor de Luz). Tecnologia de display baseada em materiais orgânicos emissores de luz, utilizada em painéis automotivos curvos e flexíveis.

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento. Atividades sistemáticas que visam ampliar o conhecimento e aplicá-lo para desenvolver novos produtos, processos ou serviços.

PA - Poliamida (Polyamide). Polímero de engenharia amplamente utilizado no setor automotivo pelas suas propriedades mecânicas, térmicas e de resistência química.

PA11, PA1010, PA12, PA46, PA56, PA410 - Graus específicos de poliamida, identificados pela composição dos monômeros (número de carbonos). Exemplos biobased incluem PA11 (óleo de rícino) e PA1010 (fontes vegetais).

PAni - Polianilina (Polyaniline). Polímero intrinsecamente condutor com condutividade ajustável, utilizado em sensores e blindagem eletromagnética.

PBS - Polibutileno Succinato (Polybutylene Succinate). Biopolíéster biodegradável com boas propriedades de processabilidade, utilizado em componentes internos e manufatura aditiva.

PCF - Product Carbon Footprint (Pegada de Carbono do Produto). Métrica que quantifica as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida de um produto, da extração até o portão da fábrica.

PCM - Phase Change Material (Material de Mudança de Fase). Material que absorve ou libera calor latente durante a mudança de estado físico, utilizado em gestão térmica passiva de módulos de bateria.

PCR - Post-Consumer Recycled (Material Reciclado Pós-Consumo). Material recuperado após o uso pelo consumidor final, reprocessado para nova aplicação industrial.

PDMS - Polidimetilsiloxano (Polydimethylsiloxane). Elastômero de silicone com alta flexibilidade e estabilidade térmica, base para elastômeros condutores com nanofios de prata ou grafeno.

PEBA - Poliéter Bloco Amida (Polyether Block Amide). Elastômero termoplástico da família TPE-A, com blocos de poliéter e poliamida; versões biobased incluem o PEBAX® Rnew®.

PEDOT:PSS - Poli(3,4-etilenodioxifenil):poliestireno sulfonado. Polímero condutor com boa transparência óptica e condutividade elétrica, amplamente utilizado em eletrônica impressa e orgânica.

PE - Polietileno (Polyethylene). Polímero de alta volume, produzido no Brasil pela Braskem em versões convencional e renovável (polietileno verde).

PEF - Polietileno Furanoato (Polyethylene Furanoate). Políéster biobased derivado do FDCA, com propriedades superiores de barreira e Tg mais elevada em relação ao PET convencional.

PEO - Óxido de Polietileno (Polyethylene Oxide). Polímero utilizado como matriz em eletrólitos poliméricos sólidos (SPE) para baterias de estado sólido.

PEEK - Poliéter-éter-cetona (Polyether Ether Ketone). Polímero de alta performance com excelente resistência térmica (Tg ~143 °C; Tf ~343 °C), mecânica e química, utilizado em aplicações sob o capô e eletrônica de potência.

PET - Politereftalato de Etileno (Polyethylene Terephthalate). Poliéster amplamente utilizado em embalagens e têxteis, com cadeia de reciclagem bem estabelecida.

PI - Poliimida (Polyimide). Polímero de altíssima estabilidade térmica (Tg > 300 °C), utilizado como substrato de referência em eletrônica flexível automotiva.

PIB - Produto Interno Bruto. Indicador macroeconômico da produção total de bens e serviços de um país em determinado período.

PLA - Políácido Láctico (Polylactic Acid). Biopolímero biodegradável derivado da fermentação de amido ou açúcar, com crescente aplicação em componentes internos automotivos reforçados com fibras naturais.

PME - Pequena e Média Empresa. Classificação empresarial baseada em critérios de porte, amplamente utilizada em políticas de fomento à inovação.

PP - Polipropileno (Polypropylene). Polímero de alta volume, principal produto da Braskem, amplamente utilizado em componentes automotivos internos, externos e estruturais leves.

PPO - Óxido de Polifenileno (Polyphenylene Oxide). Polímero de baixa constante dielétrica, utilizado em componentes de radomes e antenas para ADAS.

PPy - Polipirrol (Polypyrrole). Polímero intrinsecamente condutor, utilizado em sensores piezoresistivos e capacitivos integrados em estruturas automotivas.

PPA - Poliftalamida (Polyphthalamide). Poliamida aromática semirrígida com alta resistência térmica e química, utilizada em substituição de metais em componentes sob o capô.

PPS - Sulfeto de Polifenileno (Polyphenylene Sulfide). Polímero de alta performance com excelente resistência química e estabilidade dimensional, utilizado em sensores ópticos e de radar.

PTT - Politrimetileno Tereftalato (Polytrimethylene Terephthalate). Poliéster com boa resiliência e processabilidade; versão biobased (bio-PTT) utiliza 1,3-propanodiol de origem renovável.

PU - Poliuretano (Polyurethane). Polímero versátil utilizado em espumas, adesivos, revestimentos e elastômeros; versões biobased utilizam polióis vegetais.

PVC - Policloreto de Vinila (Polyvinyl Chloride). Polímero amplamente utilizado em isolamentos elétricos, painéis internos e componentes de acabamento.

PVDF - Fluoreto de Polivinilideno (Polyvinylidene Fluoride). Polímero com propriedades piezelétricas, utilizado como ligante em eletrodos de baterias de íons de lítio e em sensores de energia (energy harvesting).

REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. Regulamento europeu sobre substâncias químicas que restringe o uso de compostos perigosos, impactando formulações de polímeros, tintas e adesivos.

RFI - Radio Frequency Interference (Interferência de Radiofrequência). Perturbação gerada por sinais de radiofrequência sobre dispositivos eletrônicos.

RTM - Resin Transfer Molding (Moldagem por Transferência de Resina). Processo de fabricação de compósitos pela injeção de resina líquida em pré-formas de fibras em molde fechado.

SAE - Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos). Organização internacional que desenvolve normas técnicas para o setor automotivo, incluindo a série SAE J.

SBS / SEBS - Estireno-Butadieno-Estireno / Estireno-Etileno-Butadieno-Estireno. Copolímeros em bloco da família TPE-S, amplamente utilizados em aplicações de vedação e acabamento automotivo.

SEI - Solid Electrolyte Interface (Interface de Eletrólito Sólido). Camada de produtos de reação que se forma na superfície do eletrodo em baterias de íons de lítio, influenciando a vida útil e a segurança da célula.

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Entidade brasileira de educação profissional e pesquisa aplicada, com Institutos SENAI de Inovação atuando em TRLs intermediários e elevados.

SLA - Estereolitografia (Stereolithography). Processo de manufatura aditiva que cura resinas fotopoliméricas por incidência de luz ultravioleta.

SLS - Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering). Processo de manufatura aditiva que sinteriza pós poliméricos (PA12, PA11, PEEK) por laser, produzindo peças com propriedades isotrópicas.

SPE - Solid Polymer Electrolyte (Eletrólito Polimérico Sólido). Eletrólito à base de polímero sólido (ex.: PEO-LiTFSI) para baterias de estado sólido, com maior segurança térmica e ausência de risco de vazamento.

TG / Tg - Temperatura de Transição Vítrea. Temperatura na qual um polímero amorfo transita do estado vítreo (rígido) para o estado borrachoso (flexível).

TIM - Thermal Interface Material (Material de Interface Térmica). Material interposto entre componentes eletrônicos e dissipadores térmicos para reduzir a resistência térmica de contato; inclui géis, pads e adesivos poliméricos.

TPE - Elastômero Termoplástico (Thermoplastic Elastomer). Família de materiais com propriedades elastoméricas (flexibilidade, elasticidade) e termoplásticas (processabilidade por fusão, reciclabilidade), subdividida em TPE-S, TPE-O, TPE-U, TPE-E, TPE-A e TPE-V.

TPO - Elastômero Termoplástico Olefínico (Thermoplastic Polyolefin). Mistura de PP com EPDM, pertencente à classe TPE-O, com bom desempenho em para-choques, para-lamas e peças externas.

TPU - Poliuretano Termoplástico (Thermoplastic Polyurethane). Elastômero da classe TPE-U, com boa resistência à abrasão, ao óleo e à flexão, utilizado em vedações, mangueiras e componentes funcionais.

TPV - Vulcanizado Termoplástico (Thermoplastic Vulcanizate). Mistura de PP e EPDM vulcanizado dinamicamente (classe TPE-V), com maior resistência química e térmica que o TPO.

TRL - Technology Readiness Level (Nível de Maturidade Tecnológica). Escala de 1 a 9 que classifica o grau de desenvolvimento de uma tecnologia, desde a pesquisa básica (TRL 1) até a implantação industrial plena (TRL 9).

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos. Universidade federal brasileira com programas de pós-graduação de referência em Ciência e Engenharia de Materiais e polímeros.

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade federal brasileira com competências consolidadas em polímeros, compósitos e processamento de materiais.

UL - Underwriters Laboratories. Organização americana de certificação de segurança de produtos, responsável pela norma UL 94 (inflamabilidade de plásticos) e UL 2580 (baterias para veículos elétricos).

Unicamp - Universidade Estadual de Campinas. Universidade estadual paulista com forte atuação em pesquisa de polímeros, biopolímeros e materiais avançados.

UNECE - United Nations Economic Commission for Europe (Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas). Organização que desenvolve regulamentações técnicas para veículos automotores, incluindo requisitos de segurança.

USP - Universidade de São Paulo. Maior universidade do Brasil, com grupos de pesquisa de referência em polímeros, compósitos e ciência de materiais.

V2X - Vehicle to Everything (Veículo para Tudo). Tecnologia de comunicação que permite a troca de dados entre veículos e infraestrutura, outros veículos, pedestres e redes, operando na faixa de ~5,9 GHz.

VOC - Volatile Organic Compounds (Compostos Orgânicos Voláteis). Compostos presentes em solventes, tintas e adesivos que contribuem para a formação de ozônio troposférico e poluição do ar interior.

WMG - Warwick Manufacturing Group. Grupo de pesquisa e manufatura da Universidade de Warwick (Reino Unido), com competências em mobilidade sustentável e materiais avançados.

Referências Bibliográficas

ABEDSOLTAN, H. Applications of plastics in the automotive industry: current trends and future perspectives. *Polymer Engineering and Science*, v. 64, n. 3, p. 929-950, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). Perfil 2025: as indústrias de transformação e reciclagem de plástico do Brasil. São Paulo: ABIPLAST, 2025. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2025/10/PERFIL_2025ABIPLAST_digital.pdf. Acesso em: 19 maio 2026.

AIMPLAS – Instituto Tecnológico do Plástico. Plastic pilot plants. Valencia: AIMPLAS, 2026. Disponível em: <https://www.aimplas.net/plastic-pilot-plants>. Acesso em: 19 maio 2026.

ALBERTINI, Edoardo; DALLE VACCHE, Sara; VITALE, Alessandra. Bio-based vitrimers: chemistry, performance and applications. *RSC Applied Polymers*, 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). Anuário Anfavea 2025: indústria automobilística brasileira. São Paulo: ANFAVEA, 2025. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2025/04/DIGITAL-ANUARIO-2025altafinal_compressed-1.pdf. Acesso em: 19 maio 2026.

ARKEMA. Rilsan® polyamide 11 (PA11). Paris: Arkema, 2024. Disponível em: <https://www.arkema.com/global/en/products/product-finder/product/technicalpolymers/rilsan-family-products/rilsan-pa11/>. Acesso em: 19 maio 2026.

ASP, L. et al. Structural battery composites: a review. *Functional Composites and Structures*, v. 1, 2019.

ASSOCIAÇÃO DE TERMINAIS PORTUÁRIOS PRIVADOS (ATP). Relatório estatístico, 1º semestre 2024. Brasil: ATP, 2024. Disponível em: <https://www.portosprivados.org.br/files/relatorio-Semestral-2024.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

AVANTIUM. The future is Releaf® (PEF): the plant-based, recyclable polymer. Geleen: Avantium, 2024. Disponível em: <https://avantium.com/products-technologies/pef-and-fdca/>. Acesso em: 19 maio 2026.

BALDASSARRE, Brian et al. Increasing plastic circularity in the automotive sector: supply chain analysis and policy options from the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 218, 108216, 2025.

BASF SE. Ultramid® Ccycled™: polyamide chemical recycling solution contributes to TE's sustainable development. Shanghai, 2025. Disponível em: <https://www.basf.com/id/en/media/news-releases/asia-pacific/2025/04/apac-25-33>. Acesso em: 19 maio 2026.

BRASKEM. Enabling brands in their sustainability journey. São Paulo: Braskem, 2024. Disponível em: <https://www.braskem.com/portal/imgreen/newimgreen/img/portifolio-pdf-en.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

BRASIL. Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024. Institui o programa Mobilidade Verde e Inovação (MOVER). Brasília: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114902.htm. Acesso em: 19 maio 2026.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Indicadores nacionais de ciência, tecnologia e inovação 2025. Brasília: MCTI, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/indicadores/paginas/publicacoes/arquivos/indicadores_cti_2025.pdf. Acesso em: 19 maio 2026.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011.

CANDELA, A. et al. Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: review of the main materials and methods. *Heliyon*, v. 10, e29728, 2024.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES). Avaliação quadrienal 2021-2024. Brasília: CAPES, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/avaliacao/avaliacao-quadrienal>. Acesso em: 19 maio 2026.

CHEN, H. et al. Thermal conductivity of polymer-based composites: fundamentals and applications. *Progress in Polymer Science*, v. 59, p. 41-85, 2016.

CARBIOS. From complex PET waste to uncompromised quality material. Clermont-Ferrand, 2023. Disponível em: <https://www.carbios.com/en/pet-biorecycling-technology/>. Acesso em: 19 maio 2026.

DIAZ-GALBARRIATU, M. et al. Biobased polyamides: a journey from the biomass towards cutting-edge materials. *Polymers*, v. 17, e2599, 2025. Acesso em: 19 maio 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL (EMBRAPII). Relatório de gestão e resultados 2023. Brasília: EMBRAPII, 2024. Disponível em: <https://embrapii.org.br/documentos/relatorio-de-gestao-anual-2023/>. Acesso em: 19 maio 2026.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. Fraunhofer annual report 2024. Munich: Fraunhofer, 2024. Disponível em: <https://www.fraunhofer.de/en/media-center/publications/fraunhofer-annual-report/annual-report-2024.html>. Acesso em: 19 maio 2026.

GARCÍA, J. L. Enzymatic recycling of polyethylene terephthalate through the lens of proprietary processes. *Microbial Biotechnology*, v. 15, n. 11, 2022.

GUBERNATIS, J.; LOOKMAN, T. Machine learning in materials design and discovery: examples from the present and suggestions for the future. *Physical Review Materials*, v. 2, 120301, 2018.

HAGER, M. D. et al. Self-healing materials. *Advanced Materials*, v. 22, n. 47, p. 5424-5430, 2010.

HEYDARI, J. Sustainability in the automotive industry: the role of recycled materials and innovative eco-friendly solutions. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, v. 13, n. 5, p. 150-156, 2025.

IACMI. A decade of innovation: IACMI's impact. Knoxville: IACMI, 2025. 35 p. Disponível em: https://iacmi.org/wp-content/uploads/2025/06/IACMI-10-Year-Impact_Full-Report-6-3-2025.pdf. Acesso em: 19 maio 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV outlook 2025: expanding sales in diverse markets. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVOutlook2025.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

INSTITUT JACQUES DELORS. The road to a new European automotive strategy: trade and industrial policy options. Paris: Institut Jacques Delors, 2025. Disponível em: <https://institutdelors.eu/content/uploads/2025/04/REUOBQT.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

JOTHIPRAKASH, G. et al. Toward net-zero plastics: synthesis, applications and global trends of bioplastics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026.

KESSLER, M. R. Polymer matrix composites: a perspective for a special issue of polymer reviews. *Polymer Reviews*, v. 52, n. 3, p. 229-233, 2012.

KURTZ, S. M.; DEVINE, J. N. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic and spinal implants. *Biomaterials*, v. 28, n. 32, p. 4845-4869, 2007.

LUCHERELLI, M. A.; DUVAL, A.; AVÉROUS, L. Biobased vitrimers: towards sustainable and adaptable performing polymer materials. *Progress in Polymer Science*, v. 127, 101515, 2022.

MITALOVA, Z.; LITECKA, J.; DUPLÁK, J. Engineering materials on the base of bioplastics applied in automotive industry. *TEM Journal*, v. 14, n. 2, p. 1188-1193, 2025.

NANDA, S. et al. Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 20, n. 1, p. 379-395, 2022.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). How the green and digital transitions are reshaping the automotive ecosystem. Paris: OCDE, 2023. Disponível em: <https://www.oecd.org/...> Acesso em: 19 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). The future of the automotive value chain. Paris: OCDE, 2024. Disponível em: <https://www.oecd.org/...> Acesso em: 19 maio 2026.

PALANISAMY, S.; MUTHURAMALINGAM, T. In-depth scrutinization of in-mold electronics for automotive applications. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1969, n. 1, 012064, 2021.

RAMPRASAD, R. et al. Machine learning in materials informatics: recent applications and prospects. *npj Computational Materials*, v. 3, 54, 2017.

SAE INTERNATIONAL. SAE J2253: test procedures for automotive structural composite materials. Warrendale: SAE, 2017. Disponível em: https://www.sae.org/standards/j2253_201707-test-procedures-automotive-structural-composite-materials. Acesso em: 19 maio 2026.

SHON, M.; KIM, J.; KIM, H. Transforming the automotive industry: defining, clustering and efficiency analysis of the next-generation automotive ecosystem. *PLoS One*, v. 21, n. 2, e0343135, 2026.

SIMONAZZI, A.; CARRETO-SANGINES, J.; RUSSO, M. The future of the automotive industry: dangerous challenges or new life for a saturated market? Institute for New Economic Thinking Working Paper Series, n. 141, p. 1-34, 2020.

TOFAIL, S. A. M. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.

TOURNIER, V. et al. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, v. 580, p. 216-219, 2020.

UNIÃO EUROPEIA. Comissão Europeia. Proposal for a regulation on circularity requirements for vehicle design. Bruxelas, 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/...> Acesso em: 19 maio 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Parlamento Europeu; Conselho. Regulamento (UE) 2023/1542. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2023. Disponível em: <http://data.europa.eu/...> Acesso em: 19 maio 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Parlamento Europeu. The future of the EU automotive sector. Bruxelas, 2021. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/...> Acesso em: 19 maio 2026.

VAN ZEE, N. J.; NICOLAÏ, R. Vitrimers: permanently crosslinked polymers with dynamic network topology. *Progress in Polymer Science*, v. 104, 101233, 2020.

VIEYRA, H. et al. Engineering, recyclable and biodegradable plastics in the automotive industry. *Polymers*, v. 14, 3412, 2022.

WMG – Warwick Manufacturing Group. Advanced materials and manufacturing research. Coventry: University of Warwick, 2024. Disponível em: <https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg>. Acesso em: 19 maio 2026.

YAMAMURA, C. L. K. et al. Electric cars in Brazil: an analysis of core green technologies and the transition process. *Sustainability*, v. 14, 6064, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14106064>. Acesso em: 19 maio 2026.

YAN, L.; XU, H. Lightweight composite materials in automotive engineering: state-of-the-art and future trends. *Alexandria Engineering Journal*, v. 118, p. 1-10, 2025.

YAN, L.; XU, H. Lightweight composite materials in automotive engineering: state-of-the-art and future trends. Alexandria Engineering Journal, v. 118, p. 1-10, 2025.

YE, G. et al. Vitrimer as a sustainable alternative to traditional thermosets. ACS Polymers Au, v. 5, n. 5, p. 445-457, 2025.

YOUSEFI, N. et al. Highly aligned graphene/polymer nanocomposites. Advanced Materials, v. 26, n. 31, p. 5480-5487, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201305293>. Acesso em: 19 maio 2026.

YU, Y. et al. Multifunctional structural lithium-ion batteries based on carbon fiber reinforced composites. Composites Science and Technology, v. 147, p. 62-70, 2017.

ZHAO, Q. et al. A comprehensive review of solid electrolytes for lithium batteries. Progress in Natural Science: Materials International, v. 30, n. 6, p. 727-738, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.11.011>. Acesso em: 19 maio 2026.

ZHENG, J. et al. Vitrimers: current research trends and their emerging applications. Materials Today, v. 51, p. 586-625, 2021.

MINERAIS



| Sumário

1. Introdução	192
2. Visão geral global – Contextualização	194
3. Análise específica do Brasil	207
4. Horizontes de inovação	212
5. Considerações finais e recomendações	240
Referências Bibliográficas	244

1. Introdução

O avanço da transição energética evidenciou uma nova forma de dependência: a crescente demanda por minerais e materiais específicos, indispensáveis para viabilizar tecnologias de geração, transmissão e armazenamento de energia limpa. Esses insumos passaram a ser classificados como Minerais Críticos e Estratégicos (MCEs), dada sua importância tecnológica e sua vulnerabilidade a riscos de fornecimento. A relevância desse cenário se intensifica diante das projeções de longo prazo para a demanda energética global, que indicam maior consumo de energia pelo próprio setor mineral, impulsionado pela necessidade de extração, processamento e beneficiamento desses materiais.

Diante das demandas globais relacionadas à transição energética visando o direcionamento de novos mercados voltados principalmente ao desenvolvimento e aplicação de tecnologias de baixo carbono, tecnologias digitais e mobilidade sustentável, há a proporcional ou até mesmo superior necessidade de matérias-primas de origem mineral. Esses insumos minerais são, em sua maioria, fundamentais para a estruturação de produtos e tecnologias que impactam diretamente nas metas voltadas à economia de baixo carbono e, por conseguinte, de desenvolvimento sustentável.

A demanda mundial por esses minerais é pautada na adaptação da cadeia produtiva de bens de consumo aos novos mercados, buscando-se a geração de produtos específicos e de elevado valor agregado como por exemplo o desenvolvimento de células fotovoltaicas, motores elétricos e híbridos, baterias e turbinas eólicas. Dessa forma, apesar da abundância de depósitos desses minerais, tecnologias de exploração, extração e processamento dessas matérias-primas ainda não são totalmente dominadas, tornando esses minerais conhecidos como críticos ou estratégicos. Sendo assim, há a necessidade iminente, frente as demandas industriais, de investimentos direcionados, estudos aplicados e inovação no setor para que a evolução em direção a transição energética seja cada vez mais difundida.

A necessidade por minerais críticos chega à cadeia automobilística principalmente vislumbrando a eletrificação da frota de veículos global, a fim de se reduzir o consumo de combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Com isso, no âmbito da transformação do setor de transportes, a demanda por minerais críticos fica relacionada à produção de itens como baterias de armazenamento, sistemas de propulsão elétrica e diversos componentes sustentáveis.

As taxonomias/drivers identificadas para o presente estudo estão descritas no Quadro 1.

Tabela 1 – Classificação das taxonomias meso.

Taxonomia meso	Descrição
Minério/Matéria-prima	Quando o objetivo do documento se relaciona a tipos específicos de minerais estratégicos, metais críticos ou fontes de matéria-prima para a indústria automotiva (ex.: Nd, Li, Co, Ce, Mn, Pt, etc.).
Processamento/Extração	Quando o objetivo do documento se relaciona ao desenvolvimento de processos para extrair, refinar ou concentrar minerais estratégicos, incluindo rotas químicas, físicas e hidrometalúrgicas.
Componentes e Materiais Automotivos	Quando o objetivo do documento se relaciona à incorporação dos minerais em materiais automotivos (ex.: ligas metálicas, ímãs, cerâmicas condutoras, catalisadores, baterias).
Equipamento e Instrumentação	Quando o objetivo do documento se relaciona ao desenvolvimento ou modificação de equipamentos para mineração, processamento, caracterização, teste ou fabricação de componentes automotivos.
Tecnologias Digitais e Modelagem	Quando o objetivo do documento se relaciona à utilização ou desenvolvimento de simulações, modelagem computacional, IA, aprendizado de máquina, digital twins ou otimização de processos relacionados à cadeia automotiva e minerais estratégicos.
Aplicações e Produtos Finais	Quando o objetivo do documento se relaciona à aplicação final dos minerais estratégicos em tecnologias automotivas (ex.: catalisadores, baterias, ímãs para motores elétricos, sensores, sistemas de armazenamento de energia, fuel cells).

No nível Micro tem-se a classificação das particularidades de cada taxonomia da categorização Meso como tipo de aplicação e de mineral.

A aplicação dessa metodologia permitiu identificar os minerais de maior recorrência nas tecnologias voltadas ao setor automotivo, bem como analisar a evolução de sua relevância ao longo dos diferentes estágios de maturidade tecnológica. A partir dessa base analítica, os próximos tópicos detalham as tendências, oportunidades e desafios associados a cada horizonte de inovação.

2. Visão geral global – Contextualização

Os minerais críticos e estratégicos constituem-se como matérias primas essenciais para o desenvolvimento de diversas tecnologias energéticas e para a economia de modo geral, sendo necessários para atender diferentes demandas atuais da sociedade. Também conhecidos como “minerais de alta tecnologia” ou “minerais verdes”, essas matérias-primas são elementos-chave nas discussões internacionais sobre segurança energética, competitividade industrial, sustentabilidade e políticas comerciais, devido à combinação entre elevada importância econômica e riscos associados à concentração geográfica da produção e do processamento (IEA, 2024; HUND ET AL., 2020; UNIÃO EUROPEIA, 2024). [s.d.]; REUTERS, 2024).

As oscilações dos preços, os entraves logísticos, bem como fatores geopolíticos reforçam a necessidade do constante monitoramento de sua oferta e demanda. Nos últimos anos, eventos como tensões comerciais internacionais, políticas industriais voltadas à realocação produtiva e restrições à exportação de determinados insumos evidenciaram a vulnerabilidade das cadeias globais de valor, impulsionando iniciativas nacionais e regionais para diversificação de fontes e fortalecimento da resiliência industrial (IEA, 2024; IRENA, 2023).

Atualmente, diante do contexto geopolítico instável, o rumo do desenvolvimento tecnológico frente a dinâmicas de produção de baixo carbono tem sido ameaçado com discussões que vão de encontro à evolução das perspectivas e avanços decorridos do Acordo de Paris. Tal fato tem impactado de forma direta a perspectiva de uso acerca dos minerais críticos e estratégicos dentro de diferentes cadeias produtivas, principalmente a de energia e a de mobilidade. Com isso, a demanda destes minerais tende a ser constantemente alterada e devem ser acompanhadas frente às perspectivas até 2050.

Com a substituição gradual dos combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, buscando a garantia da eficiência energética, além dos avanços tecnológicos no setor de comunicação e informação, o mundo permeia por uma fase inédita na transição energética. Esse rearranjo estrutural, mesmo que com os riscos da não priorização das metas de economia de baixo carbono até 2050, segue um cenário de crescimento da demanda por recursos minerais. Diferentemente do passado, a disputa atual não se concentra em petróleo ou gás, mas sim em minerais críticos, insumos essenciais para a implementação das principais tecnologias que sustentam a nova economia energética e informacional.

Apesar dos avanços rumo a fontes renováveis, os combustíveis fósseis ainda representam a principal base do sistema energético global, respondendo por cerca de 80% da demanda mundial de energia primária, segundo análises recentes da International Energy Agency (IEA, 2024). Ao longo de quase dois séculos, petróleo, carvão e gás natural desempenharam papel central na industrialização global, sustentando a mobilidade baseada em motores a combustão e viabilizando um modelo econômico intensivo em recursos naturais, linear e altamente emissor de gases de efeito estufa (IPCC, 2023). No entanto, esse padrão tem sido cada vez mais questionado diante da intensificação dos impactos climáticos, das pressões regulatórias internacionais e da necessidade de transição para sistemas energéticos mais resilientes, eficientes e de baixo carbono.

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono é fortemente condicionado à disponibilidade desses insumos minerais. Em outras palavras, uma das principais estratégias de redução das emissões de gases de efeito estufa consiste na substituição dos combustíveis fósseis por alternativas como biocombustíveis e eletrificação. Em ambos os casos, seja em sistemas de geração elétrica renovável, seja em veículos híbridos, elétricos ou movidos a biocombustíveis, há uma demanda substancial por recursos minerais ao longo de toda a cadeia de valor, incluindo metais como lítio (Li), níquel (Ni), cobre (Cu), manganês (Mn), terras raras e alumínio (Al), essenciais para baterias, motores, turbinas e infraestruturas associadas.

2.1. Panorama mundial dos minerais estratégicos e críticos aplicados à indústria automotiva

Os minerais estratégicos e críticos assumem papel central na transformação estrutural da indústria automotiva global, sendo as matérias-primas primárias que impulsionam vertentes como, por exemplo, a eletrificação veicular, a digitalização dos sistemas embarcados e a busca por estruturas alternativas com peso e/ou qualidade similar ou superior.

Com isso, observa-se três forças principais que direcionam a demanda por recursos minerais: (a) políticas industriais e ambientais voltadas para a neutralidade climática e redução das emissões de gases de efeito estufa; (b) evolução tecnológica dos veículos, incluindo eletrificação da cadeia de potência, conectividade e automação; e (c) crescente preocupação com segurança de suprimentos e resiliência das cadeias globais de valor (IEA, 2024; UNIÃO EUROPEIA, 2024; HUND ET AL., 2020). Nesse contexto, minerais anteriormente considerados commodities passam a ser classificados como estratégicos ou críticos devido à combinação de importância econômica elevada e risco de fornecimento (IEA, 2024; USGS, 2025).

Estudos conduzidos pela International Energy Agency (IEA) indicam que um veículo elétrico pode demandar até seis vezes mais minerais do que um veículo convencional, com destaque para lítio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co), manganês (Mn) e grafita (C), além de cobre (Cu) e terras raras (ETRs) utilizados em motores elétricos e eletrônica de potência (IEA, 2024). Essa maior demanda pelas matérias-primas amplifica, também, a necessidade de diversificação geográfica e desenvolvimento tecnológico ao longo da cadeia mineral.

No âmbito da eletrificação veicular, considerando especificamente as baterias, observa-se uma contínua evolução das químicas utilizadas, buscando-se alternativas às baterias de íons de Li, que geram implicações diretas sobre a demanda mineral. Sistemas baseados em Ni-Co-Mn (NMC) e Ni-Co-Al (NCA) têm sido progressivamente otimizados para reduzir o teor de Co devido a custos elevados e questões socioambientais relacionadas à mineração, enquanto baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP) ganham espaço por apresentarem maior estabilidade térmica e menor custo relativo, apesar de menor densidade energética. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como baterias de estado sólido e sistemas sódio-íon, também sinalizam possíveis mudanças futuras no uso e demanda de determinados minerais (BNEF, 2024; IEA, 2024; GOODENOUGH; PARK, 2013; TARASCON; ARMAND, 2001).



O Li, elemento central nas baterias de íons de Li, apresenta reservas concentradas principalmente no chamado “Triângulo do Li”, formado por Chile, Argentina e Bolívia, além de depósitos relevantes na Austrália e na China. A Austrália destaca-se como o maior produtor mundial, sobretudo a partir de espodumênio, enquanto Chile e China possuem cadeias integradas envolvendo extração e processamento químico (USGS, 2025; IEA, 2024). O Ni, essencial para químicas de alta densidade energética como NMC e NCA, possui reservas expressivas na Indonésia, Austrália e Brasil, sendo a Indonésia, atualmente, o principal produtor global, impulsionada por investimentos em rotas hidrometalúrgicas voltadas à produção de materiais para baterias (USGS, 2025; IEA, 2024). Já, o Co apresenta uma das maiores concentrações geográficas entre os minerais críticos, com cerca de 70% da produção mundial localizada na República Democrática do Congo, enquanto China e Finlândia dominam etapas importantes de refino e processamento, fator que intensifica preocupações relacionadas à segurança de suprimento e sustentabilidade socioambiental (IEA, 2024; USGS, 2025).

O Mn, utilizado como estabilizador estrutural em diversas químicas catódicas, possui reservas amplamente distribuídas, com destaque para África do Sul, Austrália, Gabão e Brasil (USGS, 2025). No caso das baterias LFP, o ferro (Fe) e o fósforo (P) são elementos relativamente abundantes globalmente, o que favorece a expansão dessa tecnologia sob a perspectiva de custo e segurança de suprimento.

A grafita, utilizada majoritariamente em ânodos, apresenta significativa concentração de produção e processamento na China, responsável por parcela dominante do fornecimento global. Existem projetos em países como Moçambique, Madagascar e Canadá busquem diversificar a oferta (IEA, 2024; USGS, 2025).

Considerando as tecnologias emergentes que, embora ainda enfrentem desafios relacionados à densidade energética e maturidade tecnológica, podem alterar o cenário de demanda mineral, as baterias sódio-íon, por exemplo, tendem a reduzir a dependência de Li e Co ao utilizar sódio (Na), elemento amplamente disponível. Já, as baterias do estado sólido, apesar de manterem a dependência de lítio, podem reduzir o uso de determinados metais críticos ao permitir novas arquiteturas e composições catódicas, alterando, gradualmente, a criticidade mineral e as estratégias industriais associadas, em nível global (IEA, 2024; TARASCON; ARMAND, 2001).

Além das baterias, materiais magnéticos à base de terras raras também são essenciais em função de suas aplicações em motores elétricos de alta eficiência, especialmente em ímãs permanentes neodímio-ferro-boro (NdFeB) (GUTFLEISCH et al., 2011). No entanto, a distribuição global das reservas e da produção desses elementos apresenta elevada concentração geográfica, representando um fator crítico de risco estratégico. Estimativas recentes indicam reservas globais superiores a 120 milhões de toneladas de óxidos de terras raras, com forte predominância da China, que detém aproximadamente 44 milhões de toneladas e mantém liderança absoluta também na produção e no processamento industrial (USGS, 2025; IEA, 2024). Outros países com reservas significativas incluem Brasil, Vietnã, Rússia, Índia e Austrália (USGS, 2025).

O domínio chinês em relação às terras raras não se restringe à disponibilidade geológica, estendendo-se, também, às etapas intermediárias da cadeia de valor como a separação química e a produção de ligas de ímãs. Em 2024, por exemplo, a China concentrou cerca de 69% da produção mundial de terras raras (USGS, 2025). Nesse contexto, a diversificação de fornecimento e o desenvolvimento de tecnologias alternativas, incluindo motores elétricos sem ímãs permanentes, redução do teor de elementos críticos em ligas magnéticas e estratégias de reciclagem avançada, têm sido impulsionados por políticas industriais e estratégias corporativas em diferentes regiões (IRENA, 2023; UNIÃO EUROPEIA, 2024).

Sob o aspecto da evolução tecnológica dos veículos, a crescente tendência no uso de tecnologias de digitalização e automação amplia a demanda por cobre (Cu), silício (Si) e semicondutores avançados, evidenciando a crescente interdependência entre setores mineral, eletrônico e automotivo (IEA, 2024; ITRI, 2023). O cobre assume papel central devido à sua elevada condutividade elétrica e térmica, sendo amplamente empregado em sistemas de potência, motores elétricos, inversores, redes de alta tensão e infraestrutura de recarga. Em termos de reservas mundiais, destaca-se a elevada concentração geográfica, com o Chile liderando amplamente, seguido por Peru, Austrália, Rússia, México e Estados Unidos, enquanto China e República Democrática do Congo figuram entre importantes produtores e processadores (USGS, 2025).

No caso do Si, elemento fundamental tanto para eletrônica de potência quanto para semicondutores e sistemas fotovoltaicos integrados aos veículos, as reservas globais são consideradas abundantes, uma vez que derivam principalmente de sílica (quartzo e quartzito), amplamente distribuída geograficamente. Entretanto, a produção industrial de silício metálico e, sobretudo, de silício grau eletrônico, apresenta elevada concentração regional, com forte predominância da China na produção global (IEA, 2024; USGS, 2025).

A busca por eficiência energética e redução de massa estrutural impulsiona o uso de metais leves e ligas avançadas, como alumínio (Al), magnésio (Mg) e aços de alta resistência (AHSS), que contribuem para a redução do peso total dos veículos e melhoria da autonomia em veículos elétricos. Estudos indicam que reduções significativas de massa podem resultar em ganhos relevantes de eficiência energética, reforçando o papel estratégico desses materiais na engenharia automotiva contemporânea (KIM; WALLINGTON, 2013; WORLDAUTOSTEEL, 2021). Com isso, espera-se que a substituição de materiais tradicionais por materiais avançados também contribua para a mudança na demanda dos minerais, reforçando a necessidade de cadeias de suprimento resilientes e diversificadas frente às transformações da mobilidade elétrica (IEA, 2024).

As reservas globais de alumínio (Al) derivam principalmente da bauxita, cuja distribuição geográfica apresenta concentração relevante em países como Guiné, Austrália, Vietnã e Brasil, sendo a Austrália, China, Guiné e Indonésia alguns dos principais produtores mundiais (USGS, 2025). O magnésio (Mg) apresenta produção altamente concentrada na China, representando um potencial ponto de vulnerabilidade para cadeias industriais dependentes desse material (USGS, 2025). No caso dos aços avançados de alta resistência (UHSS), embora o ferro (Fe) seja amplamente disponível globalmente, a produção desses materiais depende de elementos de liga específicos, como manganês (Mn), cromo (Cr), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb), sendo o Brasil responsável pela maior parte da produção mundial de nióbio (USGS, 2025).

2.2. Principais tendências globais e frentes de pesquisa emergentes

A análise integrada dos dados evidencia três movimentos estruturais. O primeiro é a forte concentração de pesquisas e desenvolvimentos em aplicações já consolidadas na indústria automotiva, especialmente baterias, motores, catalisadores automotivos e ligas metálicas. O segundo é a diversificação progressiva de elementos aplicados a sistemas intermediários, como componentes estruturais, células de combustível e sistemas de energia e eletrônica de potência. O terceiro movimento corresponde à presença mais pontual de determinados minerais em aplicações específicas, indicando ampliação gradual do escopo tecnológico e exploração de novos nichos.

Observa-se que a pesquisa se concentra majoritariamente em elementos de terras raras, além de outros como alumínio, ferro, zircônio, cério e lítio. Esses minerais apresentam forte recorrência nas principais aplicações automotivas mapeadas, evidenciando sua relevância estrutural e funcional na transição tecnológica do setor. A concentração nas categorias de baterias, motores, catalisadores automotivos e componentes estruturais demonstra que o eixo predominante da produção tecnológica está diretamente associado à eletrificação veicular, aos sistemas de propulsão e ao controle de emissões.

O ferro destaca-se especialmente em aplicações relacionadas a motores, reforçando seu papel nos sistemas eletromagnéticos. De forma semelhante, o neodímio apresenta forte associação com motores, confirmando a centralidade dos sistemas magnéticos na base tecnológica analisada. O lítio, por sua vez, mostra predominância clara no campo das baterias, consolidando-se como elemento-chave nas tecnologias de armazenamento de energia.

O zircônio e o cério demonstram associação expressiva com catalisadores automotivos, evidenciando sua importância nos sistemas de controle de emissões. O alumínio apresenta distribuição transversal, estando relacionado tanto a baterias quanto a motores, ligas metálicas e componentes estruturais, o que reforça seu papel estratégico como material funcional e estrutural.

Elementos como manganês, cobalto e níquel aparecem fortemente vinculados às aplicações em baterias e motores, enquanto metais do grupo da platina, como ródio, paládio e platina, estão predominantemente associados a catalisadores automotivos. Essa configuração evidencia a convergência tecnológica em torno de materiais essenciais para eletrificação, eficiência energética e redução de emissões.

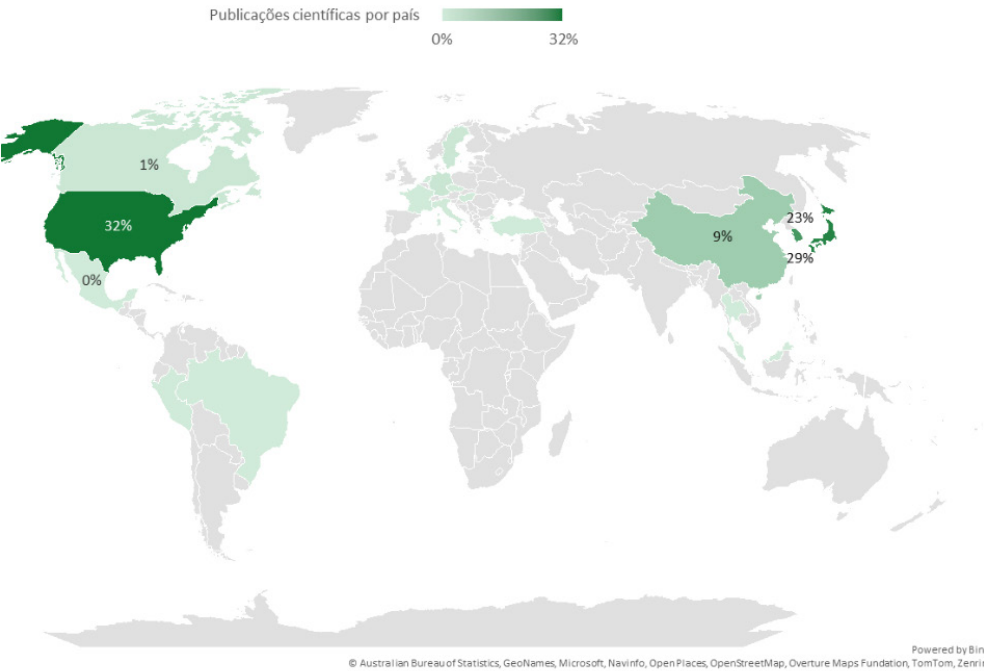
No campo das baterias, a diversidade de elementos associados indica multiplicidade de composições e rotas tecnológicas em desenvolvimento. Em motores, a forte presença de elementos de terras raras, especialmente neodímio e disprósio, associada ao ferro evidencia a importância dos sistemas magnéticos. Em catalisadores automotivos, a concentração em cério, zircônio e metais do grupo da platina reforça a relevância dos sistemas de pós-tratamento de emissões.

Já, em materiais estruturais e ligas metálicas, observa-se participação significativa de alumínio, magnésio, manganês e zinco, sugerindo foco consistente em redução de massa veicular e na otimização estrutural. Em síntese, os dados demonstram que o núcleo tecnológico mapeado se organiza em torno de baterias, motores, catalisadores automotivos e ligas metálicas, com forte dependência de terras raras e metais críticos, refletindo a centralidade desses materiais na evolução tecnológica da mobilidade automotiva.

2.3. Referências internacionais (ex.: relatórios, centros de excelência, players líderes)

A **Figura 1** demonstra que a produção científica e tecnológica sobre minerais estratégicos se concentra em polos internacionais, estando fortemente relacionada a países líderes em inovação tecnológica e cadeias avançadas de manufatura, como Estados Unidos, China, Coreia do Sul e Japão.

Figura 1 – Panorama global de pesquisas em minerais estratégicos.

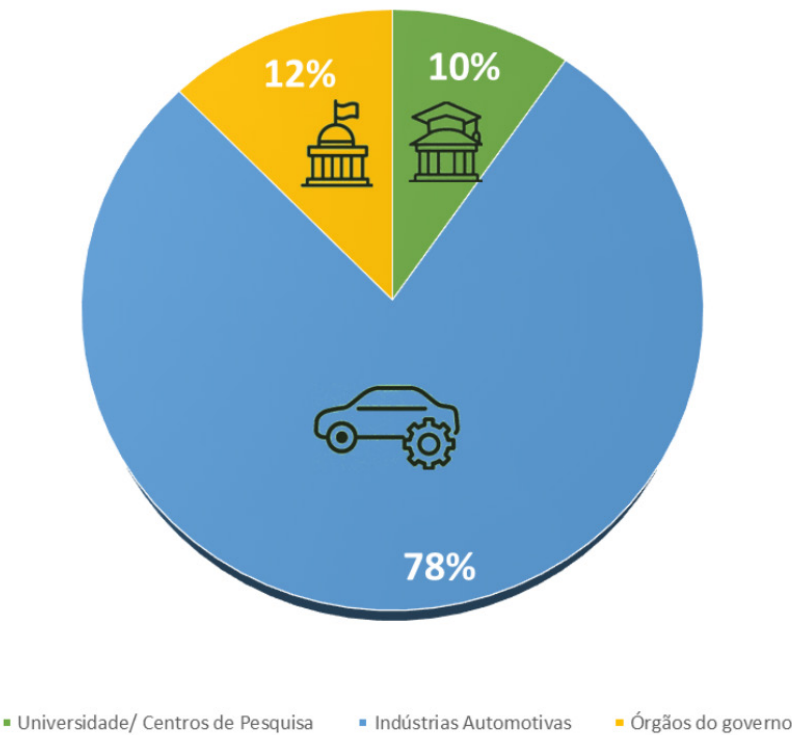


Fonte: Elaboração própria (2026).

As pesquisas demonstram que os minerais críticos ocupam posição central nas estratégias industriais e energéticas globais, revelando uma crescente interdependência entre mineração, processamento e manufatura avançada. O ecossistema internacional de inovação é marcado por uma integração profunda entre montadoras, laboratórios nacionais e universidades de excelência, configurando um ambiente no qual a coprodução tecnológica se tornou condição necessária para avanço competitivo.

A análise da **Figura 2** reforça esse fenômeno: cerca de 80% de todos os estudos avaliados contam com a participação direta da indústria automotiva, o que evidencia uma sinergia estruturada entre pesquisa científica e demandas reais do setor. Tal articulação se manifesta na liderança compartilhada em publicações, patentes e projetos estratégicos, consolidando um modelo no qual a competitividade depende, cada vez mais, da coordenação equilibrada entre ciência fundamental, engenharia aplicada e capacidade de escala industrial.

Figura 2 – Panorama das parcerias no desenvolvimento das pesquisas.

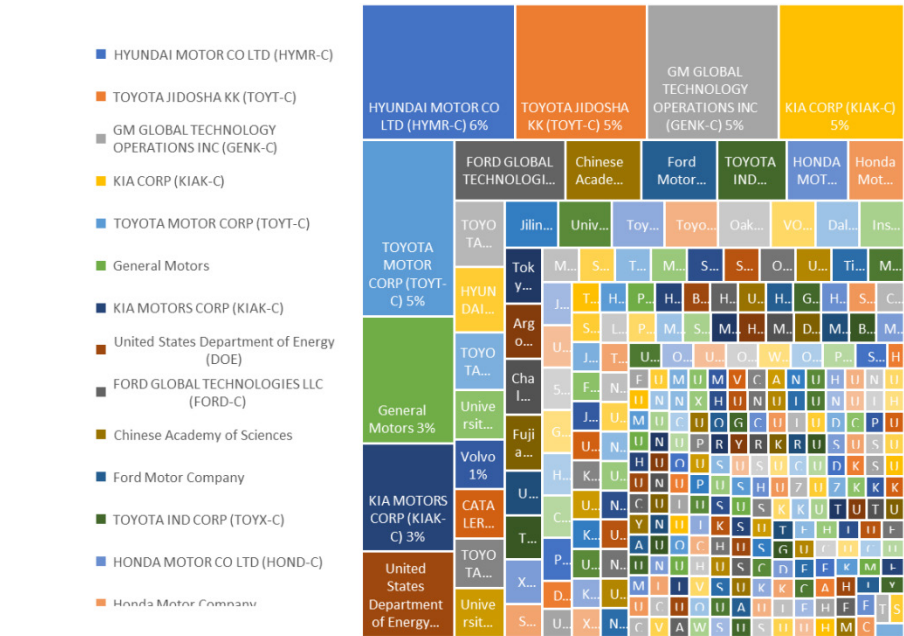


Fonte: Elaboração própria (2026).

Observa-se também um movimento crescente de integração vertical nas cadeias de baterias e materiais estratégicos, com OEMs (Original Equipment Manufacturer) estruturando áreas dedicadas às matérias-primas críticas e realizando aportes diretos em projetos de lítio. Além desse movimento, observa-se que a liderança global em pesquisa sobre minerais estratégicos e suas aplicações automotivas está fortemente concentrada em um conjunto de grandes montadoras e instituições tecnológicas.

Como ilustrado na **Figura 3**, destacam-se empresas como Hyundai, Toyota, GM, Kia, Ford, Honda, além de órgãos como o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) e a Academia Chinesa de Ciências, que figuram entre os atores mais influentes na produção de conhecimento e no avanço tecnológico do setor. Esse arranjo revela um ecossistema internacional altamente colaborativo, no qual fabricantes, universidades e centros de pesquisa compartilham conhecimento, alinham prioridades tecnológicas e direcionam investimentos estratégicos para assegurar domínio sobre materiais críticos, condição essencial à eletrificação, aos sistemas de propulsão avançados e às novas arquiteturas de mobilidade.

Figura 3 – Liderança global em pesquisa sobre minerais estratégicos e aplicações tecnológicas ligadas ao setor automotivo.

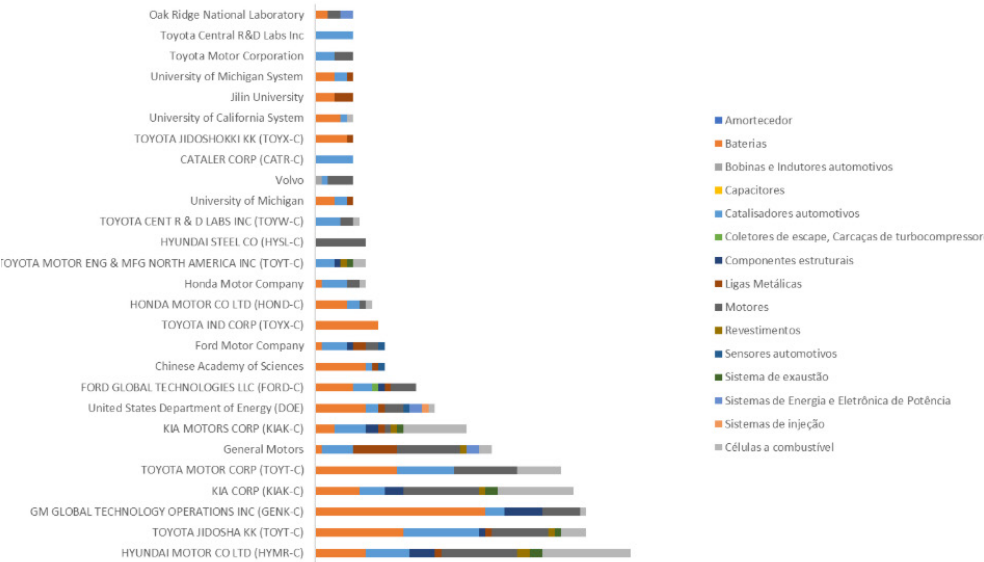


Na **Figura 4**, a Hyundai Motor Company aparece com uma estratégia tecnológica fortemente centrada no powertrain eletrificado, abrangendo motores elétricos, baterias e células a combustível. A empresa adota uma abordagem orientada à eficiência energética, explorando maneiras de minimizar perdas e aumentar o desempenho de seus sistemas de tração. Além disso, a Hyundai demonstra uso intensivo de materiais leves e ligas avançadas, alinhando-se à tendência global de redução de massa dos componentes como forma de melhorar autonomia, performance e sustentabilidade.

A Toyota Jidosha KK (Toyota Motor Corporation) também ocupa posição de destaque, impulsionando uma visão de otimização sistêmica que integra tecnologias híbridas, baterias e soluções baseadas em hidrogênio. A Toyota tem presença expressiva em pesquisas voltadas à catálise automotiva e a motores de alta eficiência, áreas nas quais seu portfólio histórico de inovação é reconhecido mundialmente. Suas iniciativas incluem o desenvolvimento de materiais avançados orientados à confiabilidade e durabilidade, com foco em longevidade e desempenho sob condições reais de operação.

A GM Global Technology Operations Inc. (GENK-C), por sua vez, demonstra forte direcionamento para a eletrificação baseada em baterias, refletindo a estratégia corporativa da General Motors de transição acelerada para veículos totalmente elétricos. A empresa investe significativamente em engenharia estrutural e na integração de plataformas, buscando maior eficiência no design veicular e maior escalabilidade para seus sistemas de propulsão elétrica. Entre suas prioridades tecnológicas destacam-se segurança, potência e eletrônica veicular, componentes essenciais para consolidar arquiteturas automotivas avançadas.

Figura 4 – Liderança global em pesquisa sobre minerais estratégicos e aplicações tecnológicas ligadas ao setor automotivo.



Fonte: Elaboração própria (2026).

No conjunto, o estudo evidencia que esses três atores, Hyundai, Toyota e GM, formam pilares importantes do ecossistema internacional de inovação. Eles influenciam diretamente a direção da pesquisa global em minerais estratégicos e aplicações automotivas, atuando em frentes que vão desde o desenvolvimento de materiais até a integração de sistemas complexos de mobilidade eletrificada.

Paralelamente, observa-se a expansão de alianças estratégicas entre montadoras, mineradoras e processadores, configurando um movimento robusto de integração ao longo das cadeias de valor. Esse processo tem se materializado por meio de joint ventures, acordos estruturados de fornecimento e investimentos diretos em operações extrativas, redesenhando gradualmente a geografia do setor automotivo e da indústria mineral.

De acordo com a EPE (2025), a Volkswagen exemplifica esse movimento ao anunciar a instalação de sua primeira fábrica de baterias no Canadá, apoiada em parcerias locais com o setor de mineração para garantir o suprimento contínuo de matérias-primas críticas. Na mesma direção, a Mercedes-Benz instalou um escritório dedicado exclusivamente à gestão de matérias-primas críticas também no Canadá, com a intenção explícita de investir diretamente em minas, fortalecendo assim sua presença nas regiões mineradoras e reduzindo riscos de suprimento (EPE, 2024).

Outro movimento emblemático é o da General Motors, que realizou um aporte de aproximadamente US\$ 650 milhões na Lithium Americas Corp., iniciativa destinada a viabilizar a produção de lítio suficiente para suportar a fabricação de cerca de 1 milhão de veículos elétricos por ano. Esses investimentos revelam uma estratégia global consistente: OEMs buscam controle direto sobre fontes de minerais essenciais, seja participando das etapas de extração, seja estabelecendo contratos estratégicos de longo prazo (EPE, 2024).

Em conjunto, essas ações reforçam o entendimento de que o acesso seguro e contínuo a minerais críticos se tornou um pilar fundamental da estratégia tecnológica e industrial das grandes montadoras. A integração entre setores, automotivo, mineração e processamento químico, deixa de ser uma tendência emergente para se consolidar como uma necessidade estrutural da cadeia de mobilidade elétrica e das tecnologias avançadas. Tais iniciativas sinalizam que a segurança de suprimento deixou de ser uma variável operacional e passou a integrar o núcleo estratégico corporativo, reforçando a necessidade de posicionamento coordenado por parte de países detentores de recursos minerais relevantes.

3. Análise específica do Brasil

O Brasil apresenta elevado patrimônio mineral, com vasta distribuição geográfica em seu território dos principais minerais estratégicos e críticos. A **Figura 5** apresenta um mapa que exemplifica a distribuição das principais minas de substâncias metálicas e grafita no Brasil.

Em relação ao níquel, o Brasil apresenta potencial significativo associado principalmente a depósitos lateríticos localizados em províncias geológicas como o Arco Magmático de Goiás e áreas do Pará, incluindo complexos mineralizados em Niquelândia (GO), Barro Alto (GO) e Onça Puma (PA) (ANM, 2025). Embora o Brasil não figure entre os maiores produtores globais, a presença de reservas relevantes e a crescente demanda por níquel classe 1 (adequado para baterias) ampliam o interesse estratégico sobre a produção nacional (USGS, 2025).

Alumínio (bauxita)
Cobre
Columbita-Tantalita
Cromo
Estanho
Ferro
Grafita
Lítio
Manganes
Nióbio
Níquel
Ouro
Vanádio
Zinco

ROM (run of mine): Sigla usada para indicar o minério bruto extraído diretamente da mina, antes de qualquer processo de beneficiamento. Em outras palavras, é o material tal como sai da lava.

Para o cobalto, as reservas brasileiras declaradas na ANM em 2024 totalizam menos de 1 mil toneladas, sendo, portanto, um mineral crítico para o país devido à sua baixa abundância. O Brasil possui reservas geológicas significativas de terras raras, associadas principalmente a depósitos carbonatíticos e lateríticos em estados como Minas Gerais, Goiás e Amazonas, posicionando-se entre os países com maior potencial geológico global (ANM, 2025; USGS, 2025).

No caso da grafita, o Brasil destaca-se como um dos principais produtores mundiais de grafita natural, com depósitos relevantes localizados principalmente em Minas Gerais e na Bahia, caracterizados por boa qualidade mineralógica e potencial de expansão produtiva (ANM, 2025; USGS, 2025). O Brasil possui, também, potencial para expansão da produção de grafita esférica e materiais ativos para baterias, segmentos de maior valor agregado atualmente concentrados na Ásia (IEA, 2024; USGS, 2025).

208

No caso do ferro, o Brasil ocupa posição de destaque global na produção e exportação, sendo um dos principais fornecedores internacionais desse mineral estratégico (USGS, 2024). O país figura entre os maiores produtores mundiais, com reservas significativas concentradas especialmente no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) e na Província Mineral de Carajás (Pará), esta última caracterizada por minérios de alto teor que favorecem menor intensidade energética no processo siderúrgico (ANM, 2025; IBRAM, 2024).

As reservas globais de alumínio derivam principalmente da bauxita, e o Brasil figura entre os países com maiores reservas e produção mundial, com operações concentradas principalmente na região Norte (USGS, 2025). No caso do magnésio, o Brasil possui recursos minerais associados principalmente a dolomitos e magnesitas, além de potencial relevante para produção a partir de salmouras e rejeitos industriais, porém apresenta participação limitada na produção global quando comparado a países como China e Rússia.

Já, em relação ao zircônio, a produção brasileira está fortemente associada aos depósitos de minerais pesados em areias costeiras, onde o zircão ocorre como subproduto da exploração de ilmenita e rutilo. Por fim, o Brasil se destaca, também, como produtor relevante de silício metálico, beneficiado pela disponibilidade de quartzo de alta pureza e matriz energética relativamente limpa baseada em hidrelétricas, o que contribui para menor pegada de carbono na produção.

A Tabela 2 apresenta a produção bruta e beneficiada do Brasil referente aos principais minerais críticos e estratégicos, no ano de 2024. Os dados demonstram a produção beneficiada é significativamente menor em comparação à produção bruta, o que exemplifica o baixo investimento no processamento desses minérios em nível nacional.

Tabela 2– Produção bruta e beneficiada dos minerais críticos e estratégicos no Brasil, em 2024.

Substância mineral	Produção bruta (ton)	Produção beneficiada (ton)
Alumínio	46 Mi	31,85 Mi
Cobalto	-	-

Cobre	87,4 Mi	1,35 Mi
Cromo	2,5 Mi	0,53 Mi
Ferro	0,53 Bi.	0,45 B
Grafita	1,1 Mi	52,2 mil
Lítio	2,5 Mi	0,94 Mi
Magnésio	13,7 Mi	13,7 Mi
Manganês	2,3 Mi	1,6 M
Molibdênio	55	-
Nióbio	15,8 Mi	3,74 Mi
Níquel	10,5 Mi	0,31 Mi
Silício	174 Mil	4,13
Terras-raras	0,59 Mi	612

Zircônio	0,38 Mi	1,7 mil
----------	---------	---------

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2026).

Apesar de o Brasil apresentar elevado patrimônio mineral, o país ainda enfrenta desafios relacionados à agregação de valor tecnológico e consolidação de cadeias industriais completas. Embora detenha reservas significativas de minerais críticos, a capacidade instalada em processamento avançado, transformação química e manufatura de componentes permanece limitada quando comparada aos principais polos globais. Essa lacuna evidencia a necessidade de investimentos direcionados em infraestrutura tecnológica, plantas-piloto e capacitação técnica, de modo a ampliar a participação nacional para além da exportação de insumos primários.

4. Horizontes de inovação

4.1. Horizonte de curto prazo (até 3 anos)

No curto prazo, predominam tecnologias em estágio avançado de consolidação, com elevada proximidade de aplicação industrial.

4.1.1. Tendências: Tecnologias e materiais com adoção iminente

As tecnologias identificadas apresentam elevado grau de maturidade e estão posicionadas para integração direta em engenharia de produto e em processos industriais. As aplicações mais recorrentes nas pesquisas concentram-se em baterias, catalisadores, componentes estruturais leves, células a combustível e motores elétricos (ver Figura 6). Esse arranjo evidencia foco em eficiência energética, redução de emissões e avanço da eletrificação veicular.

Figura 6 – Minerais estratégicos e as tecnologias que impulsionam a mobilidade automotiva no horizonte de curto prazo.



Fonte: Elaboração própria (2026).

No campo das baterias, os minerais estratégicos associados são elementos de terras raras (ETR), lítio e alumínio. Essa combinação reforça tanto a consolidação do lítio como base dos sistemas de armazenamento eletroquímico quanto o papel complementar das terras raras e do alumínio na estabilização estrutural e funcional dos componentes.

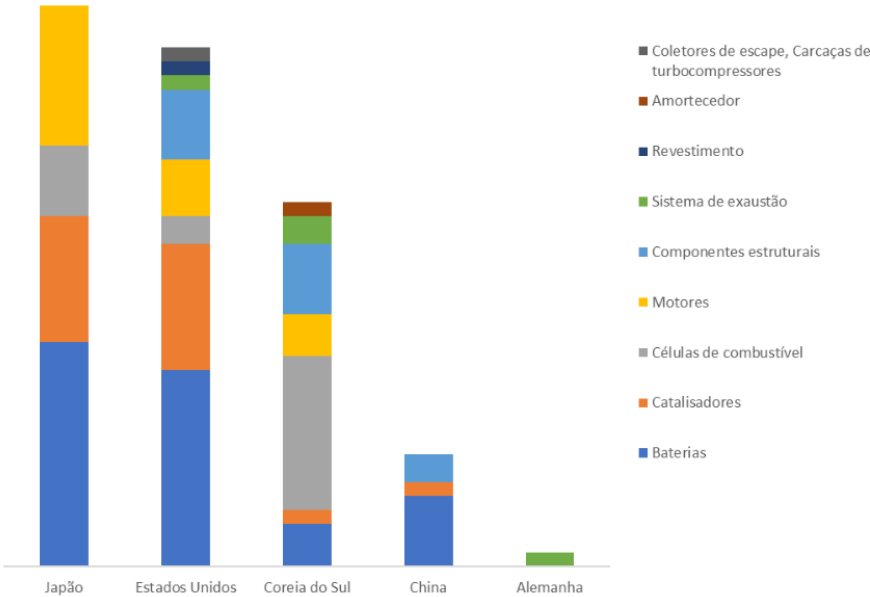
Nos catalisadores automotivos, destacam-se ETR, alumínio e zircônio. O uso desses elementos está associado ao aprimoramento do desempenho catalítico, à estabilidade térmica e à eficiência nos sistemas de controle de emissões, consolidando essa aplicação como uma das frentes tecnológicas mais maduras. Para células a combustível, os minerais estratégicos indicados são ETR, titânio e manganês, sugerindo foco no desenvolvimento de materiais com maior durabilidade, estabilidade química e desempenho eletroquímico.

Já nos motores elétricos, a combinação predominante envolve ETR, ferro e boro. Essa associação confirma a centralidade dos sistemas magnéticos avançados como base tecnológica da eletromobilidade, reforçando o papel das terras raras em aplicações de alto desempenho. Em componentes estruturais leves, a associação principal ocorre entre ETR, silício e alumínio. Esse conjunto evidencia a busca por redução de massa, melhoria de propriedades mecânicas e aumento da eficiência estrutural dos veículos.

Assim, o panorama apresentado a curto prazo demonstra associações mais objetivas entre cada aplicação e seus minerais estratégicos prioritários. O padrão geral indica forte presença transversal das terras raras nas diferentes tecnologias, enquanto lítio, alumínio, zircônio, silício, titânio, manganês, ferro e boro aparecem vinculados a aplicações específicas, configurando um núcleo consolidado de materiais estratégicos para a mobilidade automotiva.

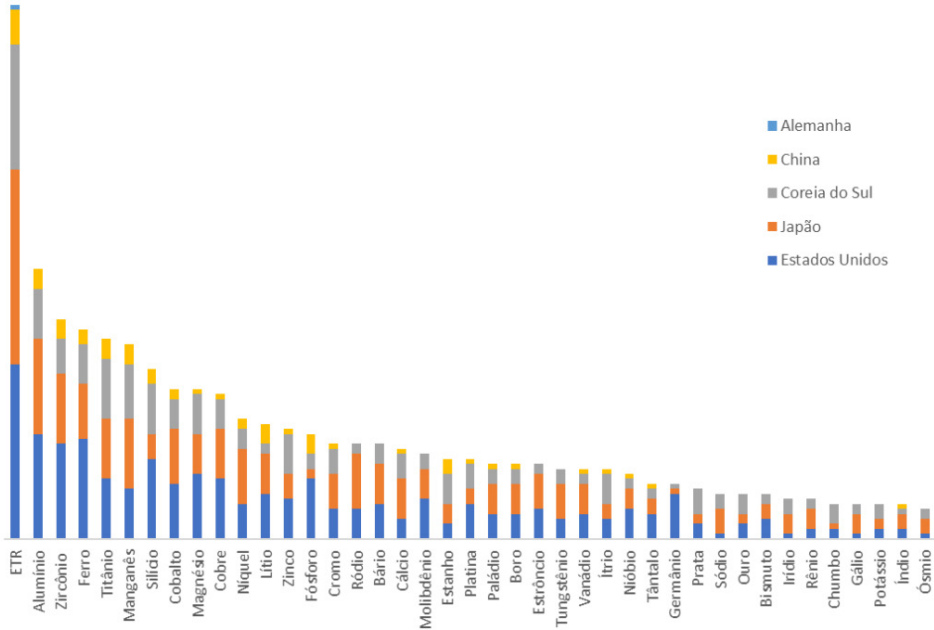
A distribuição global desses minerais evidencia padrões distintos entre os principais países líderes em inovação (ver **Figura 7 e Figura 8**). Observa-se que os Estados Unidos concentram seus esforços principalmente em baterias e catalisadores automotivos, com presença adicional em motores, componentes estruturais e sistemas de exaustão. Os minerais associados a esse perfil incluem alumínio, ferro, silício, magnésio, cobalto, cobre e zircônio, além de elementos do grupo da platina vinculados a catalisadores. Essa configuração indica uma estratégia fortemente direcionada à eletrificação, ao controle de emissões e ao aprimoramento estrutural dos veículos.

Figura 7 – Distribuição global das aplicações tecnológicas mais pesquisadas.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 8 – Distribuição global dos minerais estratégicos mais pesquisados.



Fonte: Elaboração própria (2026).

O Japão apresenta forte concentração em baterias, com presença relevante também em motores e catalisadores automotivos. Destacam-se terras raras, zircônio, manganês, titânio, níquel, cobalto e metais do grupo da platina, refletindo uma base tecnológica diversificada voltada tanto a sistemas de propulsão elétrica quanto a tecnologias de pós-tratamento de emissões. Diferentemente do que se poderia supor, a distribuição japonesa não se limita às terras raras, mas abrange um conjunto amplo de minerais estratégicos associados principalmente ao armazenamento de energia e aos sistemas motrizes.

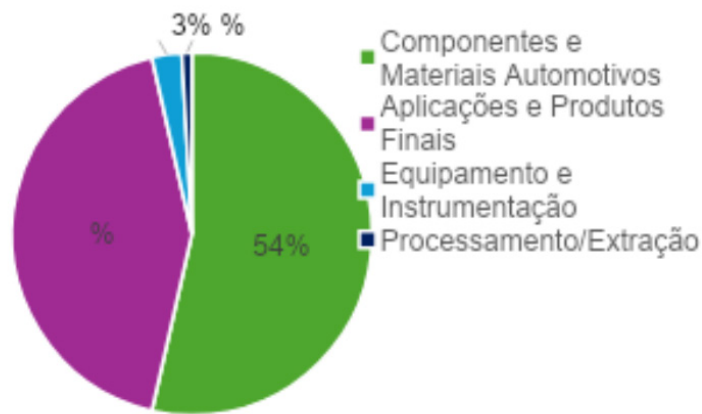
A Coreia do Sul apresenta perfil tecnológico distinto, com forte concentração em células a combustível e baterias, além de participação expressiva em componentes estruturais e motores. Observa-se presença significativa de terras raras, manganês, silício, titânio, magnésio e ferro, indicando direcionamento simultâneo para tecnologias de eletrificação e soluções associadas ao hidrogênio. A distribuição coreana demonstra maior ênfase relativa em células a combustível quando comparada aos demais países analisados.

Já a China apresenta concentração predominante em baterias, com participação adicional em componentes estruturais e catalisadores. Os minerais associados incluem lítio, manganês, alumínio, silício, titânio e terras raras, além de outros elementos vinculados a catalisadores. A configuração observada evidencia foco na consolidação da cadeia de materiais para armazenamento de energia e suporte à mobilidade elétrica.

De forma geral, os dados indicam que, no curto prazo, os países líderes direcionam seus esforços principalmente para baterias, catalisadores automotivos e motores, com variações na intensidade relativa entre eles. A eletrificação veicular emerge como eixo comum, enquanto a ênfase em células a combustível aparece de maneira mais destacada no caso da Coreia do Sul. A distribuição por mineral e aplicação demonstra convergência internacional em torno de materiais estratégicos essenciais para armazenamento de energia, sistemas de propulsão e controle de emissões, confirmando o alinhamento tecnológico global em direção à mobilidade de baixa emissão.

Na **Figura 9**, o gráfico de classificação meso das patentes concedidas revela um dado estrutural relevante: mais da metade dos registros concentra-se no desenvolvimento e incorporação de minerais estratégicos em materiais automotivos. Essa predominância indica que o esforço inovativo está fortemente direcionado ao aprimoramento das propriedades intrínsecas dos materiais, mecânicas, elétricas, magnéticas e térmicas, consolidando uma base tecnológica que sustenta diferentes aplicações ao longo da cadeia.

Figura 9 – Gráfico de classificação de taxonomias meso das patentes concedidas.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Em seguida, observa-se que uma parcela também significativa das patentes está associada ao uso final desses materiais em tecnologias automotivas (43%). Esse resultado demonstra que o movimento não se limita à pesquisa de composição e formulação, mas avança para a integração efetiva em sistemas, com foco em confiabilidade operacional, desempenho em condições reais e viabilidade industrial.

Já uma fração menor das patentes (3%) refere-se ao desenvolvimento ou adaptação de equipamentos e métodos de processamento, caracterização e fabricação. Embora proporcionalmente reduzido, esse grupo evidencia a preocupação com controle de processo, repetibilidade e qualidade, elementos essenciais para transformar inovação laboratorial em produção escalável.

Por fim, uma parcela residual de 1% aborda rotas de extração e refino de minerais estratégicos. Ainda que numericamente pouco representativo, esse eixo sinaliza atenção às etapas iniciais da cadeia, especialmente no que se refere ao controle de microestrutura e desempenho final dos materiais. Em síntese, os dados do gráfico indicam que, no curto prazo, o núcleo da inovação está concentrado majoritariamente na engenharia de materiais, seguido pela aplicação tecnológica direta, enquanto processos produtivos e etapas de extração aparecem como suportes complementares à consolidação das tecnologias prioritárias.

4.1.2. Oportunidades: Ganhos competitivos e nichos de mercado

As soluções de curto prazo oferecem oportunidades diretas de ganho competitivo. Em emissões, há potencial de melhoria de desempenho em baixa temperatura (cold start), aumento de durabilidade e redução de carga de metais nobres por meio de otimização de washcoat e formulações catalíticas. Isso se traduz em vantagem regulatória e redução de custo. No powertrain eletrificado (EV/HEV), a adoção de ímãs com maior estabilidade pode gerar menor custo e menor criticidade de suprimento, com impacto direto na competitividade do sistema de tração.

Para baterias, a exploração de estado sólido e aprimoramento de interfaces eletrodo-eletrólito (camadas protetoras e redução de impedância interfacial) representa um nicho de mercado associado a maior segurança e densidade energética. Em materiais estruturais, ligas Mg/Al e ferros fundidos otimizados contribuem para redução de massa e melhoria de resistência, usinabilidade e durabilidade, reforçando eficiência energética. Já na funcionalização de superfícies, há valor agregado em conforto, manutenção e desempenho óptico ou sensorial, ampliando diferenciação em aplicações internas e externas.

As oportunidades concentram-se no atendimento às regulações ambientais mais rigorosas, na melhoria de eficiência energética e na redução de custos associados a minerais críticos. Entretanto, desafios persistem no escalonamento industrial de eletrólitos sólidos, na repetibilidade de camadas catalíticas e no controle microestrutural necessário para manter desempenho magnético sob variações térmicas. Esse horizonte demanda uma infraestrutura industrial já estabelecida, como linhas de sinterização, coating e testes de durabilidade, complementada por plantas-piloto de baterias e materiais funcionais.

4.1.3. Desafios: Barreiras regulatórias, custo e maturidade tecnológica

Entre os principais desafios está o custo e a volatilidade de insumos críticos, especialmente terras raras e metais nobres. As soluções apontam para necessidade de reduzir carga, substituir parcialmente elementos críticos e otimizar engenharia microestrutural para manter desempenho. No caso de baterias avançadas, a industrialização exige controle rigoroso de interfaces sólido-sólido, estabilidade química e repetibilidade de processamento, aspectos recorrentes nas patentes analisadas.

Em regulação de emissões, as tecnologias devem atender requisitos de desempenho em condições reais de operação, demandando validação robusta em condições reais de operação. Isso impõe a necessidade de ciclos de desenvolvimento mais longos e maior necessidade de testes integrados entre materiais, componentes e sistemas. Além disso, há desafios associados à processabilidade e controle de microestrutura, como sinterização, precipitação, dopagem e coating com tolerâncias estreitas em porosidade, espessura de camada e dispersão de partículas.

Nesse horizonte, as barreiras regulatórias também assumem um papel de destaque. A implementação de políticas como o Critical Raw Materials Act na União Europeia e requisitos associados ao Inflation Reduction Act nos Estados Unidos introduzem critérios de rastreabilidade, conteúdo local e sustentabilidade ambiental que impactam diretamente a cadeia mineral aplicada à mobilidade elétrica (UNIÃO EUROPEIA, 2024). Esses instrumentos regulatórios tendem a reorganizar fluxos comerciais e exigir maior transparência em relação à origem dos minerais, práticas ESG e pegada de carbono dos materiais.

4.1.4. Estruturas: Infraestrutura existente e necessária

A infraestrutura existente, implícita nas soluções patenteadas, inclui plantas e linhas de pós-tratamento/catalisadores, com etapas de preparação de slurry/washcoat, deposição, calcinação, sinterização e testes de durabilidade. Na metalurgia e manufatura de ligas, estão presentes fundição, tratamentos térmicos, conformação e usinagem para ligas Fe/Mg/Al. Para ímãs, aparecem processos como moagem (incluindo jet mill), sinterização, difusão em contorno de grão e inspeção magnética e térmica.

Como infraestrutura necessária para acelerar adoção, destacam-se plantas pilotos de eletrólitos sólidos e montagem de células em ambientes controlados, além de equipamentos de laminação/compactação e caracterização eletroquímica. Também é essencial a caracterização avançada de microestrutura, porosidade e interfaces para materiais catalíticos, magnéticos e iônicos.

4.1.5. Capacitação de capital intelectual: Competências críticas a desenvolver

A capacitação técnica deve abranger química e eletroquímica de materiais, metalurgia física, magnetismo aplicado e engenharia de processos industriais. As competências críticas incluem química de materiais e catálise, com domínio de cério, zircônio, zeólitas, suportes, dispersão e estabilidade térmica. Em metalurgia física, é necessária a compreensão dos efeitos de microadições em ligas Mg/Al/Fe e sua influência em propriedades e processabilidade.

Para ímãs e eletromáquinas, é essencial o conhecimento sobre microestrutura NdFeB, coercividade, contorno de grão e segmentação para redução de perdas. Na área de eletroquímica e materiais iônicos, destacam-se eletrólitos sólidos, interfaces e estabilidade. Por fim, a engenharia de processo deve abranger sinterização, coating, controle de porosidade e escalonamento industrial.

4.1.6. Conexões necessárias: Parcerias com universidades, centros de pesquisa e indústria

A indústria automotiva aparece como eixo central, com presença significativa de players industriais na base. Observa-se forte interação entre as indústrias automotivas e as universidades/institutos de pesquisa, indicando modelos de co-desenvolvimento. A concentração de produção tecnológica em determinados atores reforça a importância de parcerias estratégicas. No curto prazo, a conexão mais crítica é o consórcio entre montadora, fornecedor de materiais e laboratório (universidade ou instituto) para validação acelerada em termos de durabilidade, escala e custo.

4.1.7. Lacunas técnicas e de infraestrutura: Pontos críticos para viabilização

Persistem lacunas relacionadas à escala e repetibilidade de materiais catalíticos e camadas, especialmente quanto à dispersão, porosidade e estabilidade térmica. Há também o desafio de manter coercividade em alta temperatura, evidenciando gap entre desenvolvimento laboratorial e produção em escala. Em eletrólitos sólidos, as interfaces ainda demandam controle de impedância, contato e estabilidade química/mecânica. Adicionalmente, há a necessidade de rastreabilidade e estratégia de suprimento de minerais críticos, coerente com o foco do dataset em minerais estratégicos e substituições.

4.2. Horizonte de médio prazo (até 5 anos)

Esse horizonte deixa de enfatizar materiais “de aplicação” (ex.: ímãs, catalisadores, células prontas) e passa a focar em materiais de partida, pós, sais, haletos, interfaces, separadores e processos de fabricação. A composição mineral se torna mais finamente definida, especialmente pelas necessidades de controle microestrutural e escalonamento industrial. Percebe-se também maior presença de metais nobres (Pd, Pt) e de elementos estabilizadores como escândio.

4.2.1. Tendências: Tecnologias e materiais com adoção iminente

No médio prazo, observa-se uma reorganização das prioridades tecnológicas quando comparado ao curto prazo. As aplicações mais destacadas passam a ser, nesta ordem, motores elétricos, baterias, catalisadores, ligas metálicas e células a combustível (ver **Figura 10**).

Figura 10 – Minerais estratégicos e as tecnologias que impulsionam a mobilidade automotiva no horizonte de médio prazo.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Notam-se pequenas modificações nos minerais relacionados às essas aplicações, especialmente em baterias, quando os elementos de terras raras e o alumínio passam a ser substituídos nos estudos por níquel e cobalto, sinalizando foco em cátodos NMC, estabilidade térmica e degradação. Nos motores elétricos, mantém-se a centralidade dos sistemas magnéticos baseados em neodímio e boro. Em relação ao curto prazo, permanece a ênfase nos ímãs permanentes, mas o alumínio aparece de forma mais explícita como material associado, reforçando a integração entre desempenho magnético e soluções estruturais e térmicas.

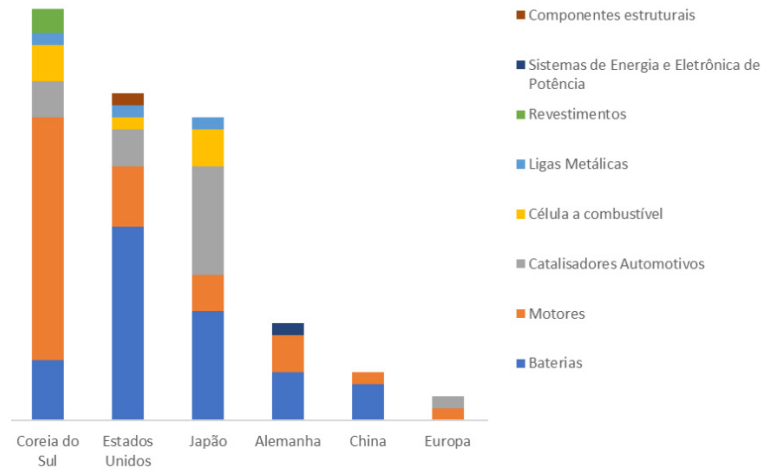
Nas ligas metálicas, permanece o alumínio como material-chave, assim como o magnésio. O cério surge como elemento associado, mantendo a presença das terras raras nesse grupo, porém de forma direcionada a aplicações estruturais específicas, sugerindo amadurecimento das rotas de microadição. Já, nas células a combustível, o cério continua presente, mas o médio prazo destaca de maneira mais clara a platina e o tungstênio, evidenciando consolidação dos materiais catalíticos nobres e maior direcionamento a desempenho eletroquímico e durabilidade.

De modo geral, o que se mantém do curto para o médio prazo é a estrutura das aplicações prioritárias e a presença de minerais críticos estratégicos. O que muda é a redução da dispersão tecnológica e a maior especialização dos conjuntos de materiais por aplicação, indicando transição e uma fase exploratória para uma fase de consolidação e direcionamento mais preciso das rotas tecnológicas. No médio prazo, observa-se um movimento global de consolidação tecnológica e escalonamento industrial, no qual fica evidente a distribuição internacional das aplicações tecnológicas e dos minerais estratégicos (ver **Figura 11 e Figura 12**), que revelam padrões distintos de especialização por país.

A Coreia do Sul apresenta forte concentração em motores e baterias, além de participação relevante em catalisadores automotivos e células a combustível. O lítio é o principal mineral associado às baterias, enquanto os motores concentram ampla diversidade de terras raras, incluindo neodímio, disprósio, samário, praseodímio, térbio, gadolínio e outras, além de boro, manganês e ferro. Nos catalisadores, destacam-se cério, zircônio e paládio. Diferentemente do que se poderia inferir, o manganês, o silício e o titânio não aparecem como elementos dominantes na matriz sul-coreana; o protagonismo recai sobre terras raras associadas a sistemas magnéticos e sobre o lítio em armazenamento eletroquímico.

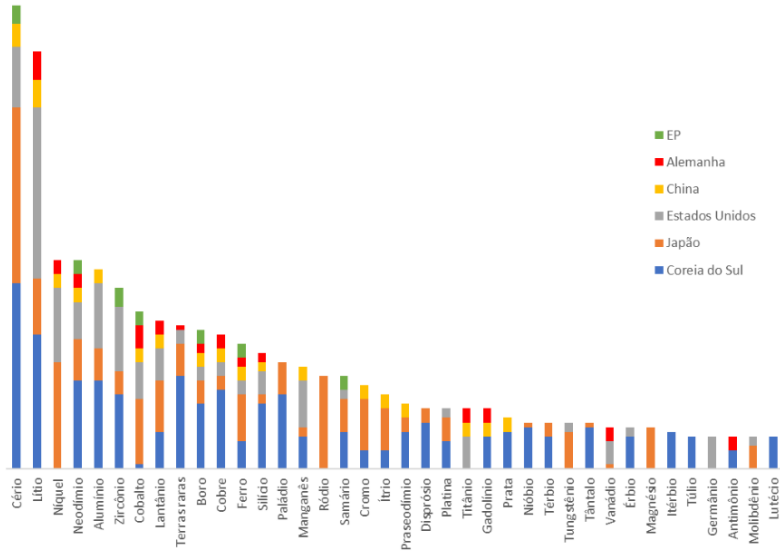
O Japão demonstra perfil equilibrado entre catalisadores automotivos, baterias, células a combustível e motores. Em catalisadores, observa-se forte presença de ródio, cério, paládio e platina. Nas baterias, destacam-se lítio, níquel e cobalto. Em motores, há uma diversidade de elementos, incluindo ferro, cromo, magnésio, neodímio, samário e outras terras raras. Assim, a estratégia japonesa se caracteriza por diversificação tecnológica, com atuação simultânea em armazenamento de energia, controle de emissões e materiais estruturais avançados.

Figura 11 – Distribuição global das aplicações tecnológicas mais pesquisadas



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 12 – Distribuição global dos minerais estratégicos mais pesquisados.



*EP: Pedidos de patentes depositados no Escritório Europeu de Patentes ou European Patent

Os Estados Unidos concentram seus esforços predominantemente em baterias, seguidos por motores, catalisadores, células a combustível e ligas metálicas. O lítio é amplamente dominante nas baterias, acompanhado por níquel, manganês, cobalto, titânio e germânio. Em motores, destacam-se neodímio e níquel, além de outras terras raras. As ligas metálicas e os sistemas estruturais incluem alumínio, zircônio e manganês. Diferentemente do que foi inicialmente indicado, o silício e o magnésio não figuram como minerais centrais na matriz norte-americana; o foco principal está na cadeia eletroquímica das baterias e em materiais magnéticos para motores.

A China apresenta forte concentração em baterias, seguidas por motores. Nos motores, observa-se ampla diversidade de minerais, incluindo neodímio, praseodímio, lantânio, gadolínio, níquel, manganês, cobre, alumínio e outros elementos associados a sistemas magnéticos e estruturais. Nas baterias, o lítio aparece como principal mineral. Diferentemente do curto prazo, níquel, cobalto e manganês não apresentam predominância isolada nas baterias chinesas dentro deste conjunto; a maior diversidade mineral está associada aos motores.

A Alemanha apresenta distribuição concentrada em baterias, motores e sistemas de energia e eletrônica de potência. Elementos como vanádio, telúrio, bismuto, níquel, cobre, titânio, gadolínio, antimônio e lantânio aparecem associados principalmente aos sistemas de energia e eletrônica. Em motores, destacam-se neodímio, boro, ferro e terras raras. O lítio aparece nas baterias, mas com volume inferior ao observado em Estados Unidos, Japão e Coreia do Sul.

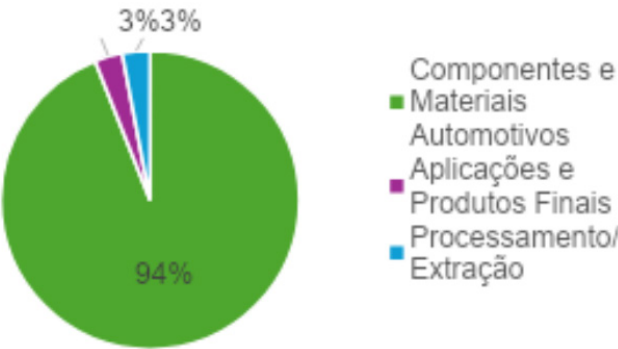
De forma agregada, o estudo evidencia que motores constituem a aplicação com maior volume de ocorrências, seguidos por baterias e catalisadores automotivos. Células a combustível e componentes estruturais apresentam participação mais restrita no conjunto analisado. O padrão global revela forte dependência de lítio para baterias e de terras raras para motores, enquanto os catalisadores mantêm associação predominante com cério e platina.

No médio prazo, as tecnologias identificadas apresentam maturidade emergente, concentrando-se principalmente no aprimoramento de materiais magnéticos baseados em terras raras para motores, na consolidação de composições eletroquímicas baseadas em lítio para baterias e na otimização de catalisadores automotivos. Observa-se também a diversificação de ligas metálicas e materiais aplicados a sistemas de energia e eletrônica de potência, especialmente em países europeus.

As tendências deste horizonte indicam intensificação do desenvolvimento de materiais magnéticos de alto desempenho, melhorias em rotas de produção de compostos intermediários de terras raras, otimização de materiais ativos para baterias à base de lítio e aperfeiçoamento de catalisadores voltados a regimes reais de emissão. Nota-se, ainda, a busca por redução do teor de terras raras em motores, sem comprometer desempenho magnético, e o aprimoramento de interfaces eletroquímicas para maior estabilidade térmica em baterias. Em síntese, evidencia-se que o eixo estruturante da mobilidade automotiva global se concentra em motores e baterias, com os países apresentando especializações distintas dentro dessas aplicações, mas convergindo na dependência de lítio e elementos de terras raras como pilares da transição tecnológica.

Na **Figura 13**, o gráfico de classificação meso das patentes depositadas evidencia uma concentração ainda mais intensa na etapa de engenharia de materiais e componentes. A esmagadora maioria dos registros está associada ao desenvolvimento e aprimoramento de materiais automotivos, indicando que este horizonte é fortemente orientado à consolidação de propriedades críticas, magnéticas, eletroquímicas e mecânicas, com foco em desempenho estável e viabilidade de escalonamento industrial.

Figura 13 – Gráfico de classificação de taxonomias meso das patentes depositadas



Fonte: Elaboração própria (2026).

Esse dado reforça que o médio prazo não está centrado em expansão de aplicações, mas sim no refinamento técnico das soluções já priorizadas, especialmente em motores e baterias. O esforço inovativo concentra-se na otimização de coercividade, estabilidade térmica, eficiência eletroquímica e resistência estrutural, preparando os sistemas para produção em escala com maior previsibilidade de custo e qualidade.

Uma parcela significativamente menor dos registros refere-se à aplicação final em produtos embarcados, o que indica que a integração direta no veículo já começa a aparecer, mas ainda não constitui o foco predominante desse horizonte. Trata-se de um estágio de transição, no qual os ganhos de material passam gradualmente a ser convertidos em soluções integradas.

Por fim, observa-se participação igualmente reduzida de patentes relacionadas a processamento e extração. Ainda que minoritário, esse eixo revela preocupação estratégica com controle de microestrutura, qualidade de insumos e segurança de abastecimento, sobretudo para materiais magnéticos e eletroquímicos. Em suma, o gráfico confirma que, no médio prazo, a prioridade global está na consolidação técnica e industrial dos materiais críticos, enquanto aplicação final e cadeia de suprimento aparecem como vetores complementares de suporte ao escalonamento tecnológico.

4.2.2. Oportunidades: Ganhos competitivos e nichos de mercado

As oportunidades envolvem redução de riscos de suprimento, maior controle de qualidade e ganhos de eficiência sistêmica. Contudo, a transição do laboratório para a produção robusta exige controle rigoroso de impurezas, oxidação, variabilidade de processo e conformidade com requisitos ambientais, de saúde e segurança.

Esse cenário demonstra a necessidade de verticalização da cadeia, com domínio de rotas de pós, sais e processamento para reduzir dependência externa. Em materiais eletromagnéticos, há potencial de ganhos em eficiência e redução de perdas. No que tange as emissões, materiais de adsorção e catalisadores cold start podem gerar vantagem em homologação e consumo.

Tem-se então um indicativo para se pensar em plantas-piloto dedicadas, infraestrutura de metrologia avançada e sistemas de controle de qualidade integrados. Adicionalmente, será necessária a formação especializada em engenharia de processos de pós, difusão e controle magnético.

4.2.3. Desafios: Barreiras regulatórias, custo e maturidade tecnológica

No horizonte de médio prazo, os desafios para consolidação de cadeias nacionais de minerais estratégicos voltadas à indústria automotiva deslocam-se do estágio inicial de viabilização para a consolidação industrial em escala. O foco está no escalonamento de rotas químicas e metalúrgicas, controle de impurezas e oxidação, estabilidade operacional e competitividade sistêmica.

O escalonamento industrial dessas rotas implica desafios associados à segurança de processo, sobretudo em operações que envolvem reagentes halogenados, ácidos fortes e etapas hidrometalúrgicas sensíveis. Processos de lixiviação, extração por solventes e refino químico demandam conformidade ambiental robusta, monitoramento contínuo de efluentes e sistemas avançados de controle de emissões atmosféricas.

Uma vez que são tecnologias ainda em maturação, dependem de validação em linha, análise de custo total, rastreabilidade de qualidade e integração sistêmica ao projeto veicular. Nesse contexto, as políticas industriais, os instrumentos de financiamento tecnológico e a estabilidade regulatória serão elementos centrais para reduzir riscos e acelerar os desenvolvimentos em um cenário de médio prazo. No médio prazo, a previsibilidade e harmonização regulatória tornam-se fatores críticos de competitividade frente a países que vêm estruturando marcos regulatórios específicos para minerais críticos, como observado na União Europeia com o Critical Raw Materials Act (UNIÃO EUROPEIA, 2024).

4.2.4. Estruturas: Infraestrutura existente e necessária

Para o médio prazo, é necessária planta-piloto de pós, ímãs e insumos, com fornos, atmosferas controladas, moagem, classificação, manuseio de pós estruturado. Também são essenciais infraestruturas de ensaios magnéticos e eletromecânicos, bem como, plantas-piloto de formulação catalítica com testes de envelhecimento acelerado.

4.2.5. Capacitação de capital intelectual: Competências críticas a desenvolver

Exige-se domínio em engenharia de processos para pós, incluindo cinética, controle de oxigênio, granulometria e passivação. Em paralelo, são fundamentais competências em metalurgia e magnetismo aplicado e em engenharia de segurança e meio ambiente para processos sensíveis.

4.2.6. Conexões necessárias: Parcerias com universidades, centros de pesquisa e indústria

Requer-se integração entre fornecedores de materiais e montadoras para especificação e validação. Universidades e institutos contribuem com metrologia, estudo de degradação e modelagem. O ecossistema de extração e processamento também deve estar articulado, conforme indicado na taxonomia.

4.2.7. Lacunas técnicas e de infraestrutura: Pontos críticos para viabilização

Nesse cenário, persistem lacunas na transição de processo de bancada para processo robusto, com foco em eficiência de produção, variabilidade e custo por kg. Controle de pureza e estabilidade são críticos para materiais magnéticos e catalíticos. Há a necessidade de bancada de testes integrada, conectando material, componente e subsistema.

4.3. Horizonte de longo prazo (até 10 anos)

O longo prazo é sustentado por artigos científicos que exploram fundamentos e novas rotas tecnológicas ainda em estágios iniciais de maturidade. Os artigos analisados exploram novas combinações materiais e mecanismos em catálise, eletroquímica e magnetismo com expansão de alternativas e fundamentos associados a terras raras e minerais críticos.

4.3.1. Tendências: Tecnologias e materiais com adoção iminente

No longo prazo, observa-se uma inflexão mais clara nas frentes tecnológicas quando comparado aos horizontes de curto e médio prazo. Permanecem temas já estruturantes, como motores, ímãs, catalisadores e ligas metálicas, mas surgem duas mudanças relevantes: a consolidação explícita do uso de hidrogênio associado a catalisadores e a incorporação de sistemas de energia e eletrônica de potência como nova frente estratégica (Figura 14). Essas áreas já não se concentram mais no “problema imediato”, mas sim, em novos paradigmas tecnológicos.

Em relação ao curto e médio prazo, os motores continuam centrais também no longo prazo, porém o foco desloca-se para ímãs avançados, com manutenção do neodímio e ferro já consolidados anteriormente e maior ênfase em elementos associados à estabilidade magnética, como o disprósio. Isso indica continuidade tecnológica, mas com refinamento de desempenho.

Nos catalisadores, mantém-se o protagonismo do cério e do zircônio, já presentes nos horizontes anteriores, porém, o longo prazo incorpora explicitamente o hidrogênio como vetor tecnológico e reforça a presença do lantânio. Assim, há continuidade nos materiais-base, mas com ampliação do escopo de aplicação.

Figura 14 – Minerais estratégicos e tecnologias que impulsionam a mobilidade automotiva no longo prazo



Fonte: Elaboração própria (2026).

Nas ligas metálicas, observa-se forte estabilidade em relação ao médio prazo, com manutenção de magnésio, alumínio e cério. Diferentemente da narrativa de ruptura, aqui o longo prazo indica aprofundamento e otimização de sistemas já consolidados.

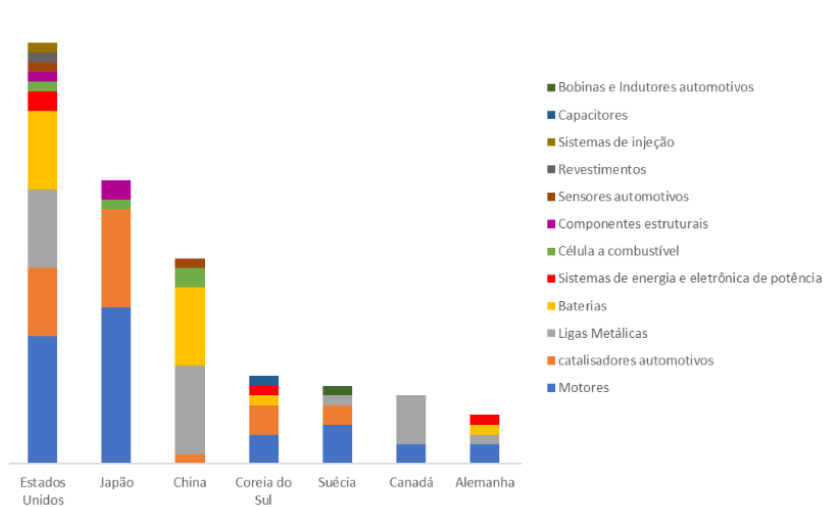
A principal mudança ocorre em baterias, as quais denominamos aqui de “nova geração”. O lítio permanece, mas surge, de forma clara, o sódio ao lado do cobalto, sinalizando exploração de químicas alternativas em comparação ao foco concentrado em lítio, níquel e cobalto observado

Além disso, o longo prazo introduz com mais clareza os sistemas de energia e eletrônica de potência, com presença de elementos como ítrio, cério e bário, tema que não aparecia como foco nos horizontes anteriores. Essa inclusão indica ampliação do olhar para além do powertrain, alcançando componentes eletrônicos e arquiteturas energéticas mais complexas.

De forma sintética, enquanto o curto prazo estava associado à consolidação de tecnologias maduras e o médio prazo à especialização e verticalização dos insumos críticos, o longo prazo combina continuidade em motores, catalisadores e ligas com abertura para novas químicas de baterias e maior protagonismo da eletrônica de potência e do hidrogênio. Não há abandono completo das rotas anteriores, mas sim diversificação e expansão do escopo tecnológico. Paralelamente, ganha relevância o desenvolvimento de rotas de processamento e extração alinhadas à sustentabilidade e à circularidade.

Com relação à distribuição global, observa-se que Estados Unidos, Japão e China continuam assumindo posição de liderança nas pesquisas relacionadas a minerais estratégicos aplicados à eletrificação e ao desenvolvimento de materiais avançados. Esses países mantêm um ritmo acelerado de produção científica voltado para tecnologias disruptivas, incluindo novos arranjos de motores elétricos, novos sistemas catalíticos, baterias alternativas e materiais estruturais de alta performance (ver **Figura 15 e Figura 16**).

Figura 15 – Distribuição global das aplicações tecnológicas mais pesquisadas.

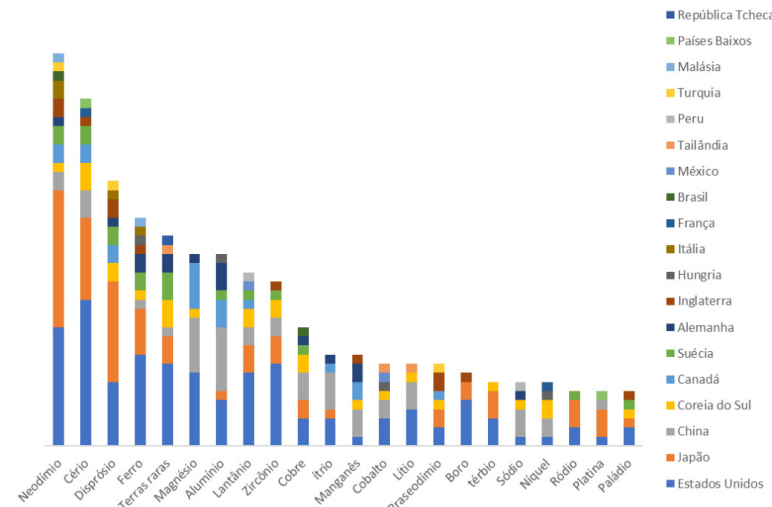


Entretanto, diferentemente dos horizontes anteriores, nota-se uma mudança na centralidade tecnológica: os motores passam a concentrar o maior volume de aplicações, superando baterias e ampliando sua relevância como eixo estruturante da inovação. Essa inflexão indica consolidação dos sistemas magnéticos avançados como principal vetor de transformação da mobilidade, com forte presença de terras raras e elementos associados a desempenho eletromagnético. Ao mesmo tempo, mantém-se a relevância de catalisadores automotivos e ligas metálicas, que seguem como áreas estratégicas, porém com papel mais complementar em relação ao protagonismo dos motores.

As baterias permanecem como campo importante, mas com menor predominância relativa quando comparadas aos estágios anteriores. Observa-se uma transição de foco: sai o crescimento acelerado em novas químicas como tema dominante e entra o aprimoramento de desempenho, estabilidade e integração sistêmica aos demais componentes do veículo.

Outra característica marcante do longo prazo é a ampliação do escopo tecnológico. Aplicações como sistemas de energia e eletrônica de potência, sensores, bobinas e capacitores passam a aparecer de forma mais estruturada, ainda que com menor volume, sinalizando diversificação das frentes de inovação e maior sofisticação dos sistemas automotivos.

Figura 16 – Distribuição global dos minerais estratégicos mais pesquisados.



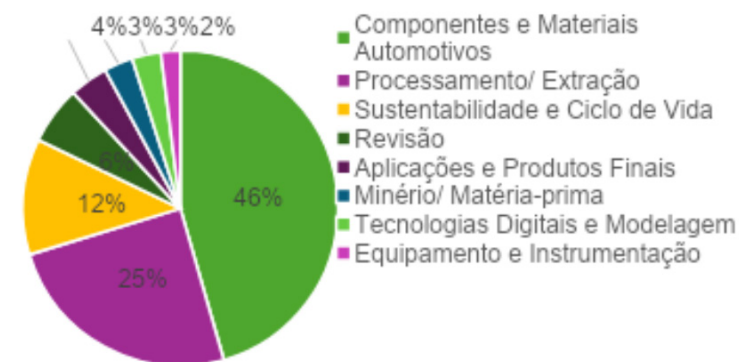
Do ponto de vista material, mantém-se a centralidade das terras raras nos motores e a presença de metais estruturais leves em ligas metálicas, reforçando que a busca por eficiência energética e redução de massa continua sendo um direcionador técnico permanente. Contudo, o padrão observado sugere menor dispersão mineral e maior consolidação em torno de conjuntos materiais já estratégicos.

Assim, o horizonte de longo prazo não se caracteriza por ruptura radical nas bases materiais, mas por aprofundamento tecnológico, refinamento de desempenho e consolidação industrial. A inovação desloca-se do desenvolvimento exploratório para a otimização avançada e integração sistêmica, preparando o terreno para uma mobilidade mais eficiente, eletrificada e tecnologicamente madura.

Na Figura 17, o gráfico de classificação meso dos artigos científicos revela uma estrutura mais equilibrada e diversificada quando comparada aos horizontes anteriores, refletindo maior maturidade conceitual e ampliação temática da agenda de pesquisa. Embora a maior parcela ainda esteja concentrada em componentes e materiais automotivos, essa participação é significativamente menor do que a observada nas patentes de curto e médio prazo. Isso indica que, no campo científico, o esforço não está exclusivamente voltado à engenharia direta de materiais, mas distribuído entre múltiplos eixos complementares.

Destaca-se, nesse contexto, o crescimento expressivo das pesquisas em extração e processamento, que passam a ocupar posição relevante no conjunto analisado. Diferentemente dos horizontes anteriores (curto e médio), onde esse tema aparecia de forma residual, o longo prazo demonstra preocupação consistente com rotas produtivas avançadas, controle microestrutural e recuperação de elementos críticos, evidenciando visão sistêmica da cadeia e características de circularidade.

Figura 17 – Gráfico de classificação de taxonomias meso dos artigos.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Outro eixo que ganha relevância é sustentabilidade e ciclo de vida, ausente como categoria estruturada nos horizontes anteriores. A presença significativa desse bloco indica mudança qualitativa na agenda científica, incorporando temas como circularidade, redução de impactos ambientais e mitigação de dependência de minerais críticos.

Os artigos de revisão também assumem papel estratégico, consolidando conhecimento acumulado e identificando lacunas tecnológicas para escalonamento. Essa característica reforça que o longo prazo é marcado não apenas por experimentação, mas por organização e síntese do conhecimento produzido. As categorias relacionadas a aplicações finais, matéria-prima, tecnologias digitais e modelagem, bem como equipamento e instrumentação, embora com menor participação individual, demonstram diversificação temática e maior integração entre ciência dos materiais, engenharia de processo, simulação avançada e avaliação de cadeia de suprimento.

Em síntese, conclui-se que o longo prazo se caracteriza por uma agenda científica mais distribuída e sistêmica: além da continuidade no desenvolvimento de materiais estratégicos, há fortalecimento de temas ligados a processamento, sustentabilidade, modelagem digital e segurança de fornecimento. Diferentemente do curto e do médio prazo, fortemente concentrados na consolidação de materiais para aplicações específicas, os estudos a longo prazo ampliam o escopo para integrar desempenho, cadeia produtiva, impactos ambientais e ferramentas digitais em uma abordagem mais abrangente da mobilidade automotiva.

4.3.2. Oportunidades: Ganhos competitivos e nichos de mercado

No horizonte de dez anos, o Brasil poderá obter ganhos competitivos ao desenvolver novas famílias tecnológicas baseadas em minerais estratégicos e posicionar-se como fornecedor de soluções de baixo carbono para a indústria automotiva. A matriz elétrica renovável constitui vantagem relevante na produção de materiais intensivos em energia, como alumínio, silício e insumos grau bateria, especialmente diante do aumento das exigências internacionais de rastreabilidade e pegada de carbono.

Entretanto, essas oportunidades dependerão da elevação do TRL, padronização industrial compatível com normas automotivas globais e integração a plataformas internacionais. A consolidação dessas frentes exige centros avançados de P&D, plataformas de prototipagem e scale-up, além de integração de modelagem multiescala, engenharia de reciclagem e ferramentas de avaliação de ciclo de vida. Novas arquiteturas e materiais podem redefinir trade-offs entre durabilidade, custo, densidade e segurança.

4.3.3. Desafios: Barreiras regulatórias, custo e maturidade tecnológica

No horizonte de longo prazo, os principais desafios são a baixa maturidade tecnológica (TRL) e o risco de escalonamento, uma vez que a baixa maturidade tecnológica exige a consolidação de tecnologias, cujo risco de escalonamento industrial permanece elevado. O risco tecnológico no longo prazo está diretamente relacionado ao desafio do escalonamento (scale-up) seguro e economicamente viável. Processos que apresentam desempenho promissor em escala laboratorial frequentemente enfrentam limitações quando submetidos a volumes industriais, seja por instabilidade de processo, sensibilidade a impurezas ou custos energéticos elevados. Dessa forma, a incorporação desses novos materiais e tecnologias exigirá a necessidade de desenvolvimento de testes automotivos com foco em confiabilidade, ciclo e custo.

As barreiras regulatórias no longo prazo tendem a incorporar exigências ambientais e de rastreabilidade mais rigorosas, alinhadas às metas globais de neutralidade climática. Mecanismos como o ajuste de carbono na fronteira europeia (CBAM), regulamentações sobre due diligence e rastreabilidade de cadeias minerais reforçam a necessidade de transparência quanto à origem dos insumos, pegada de carbono e conformidade socioambiental (UNIÃO EUROPEIA, 2024).

Por fim, no cenário de longo prazo, a superação da baixa maturidade tecnológica dependerá de políticas industriais estáveis, instrumentos de financiamento de inovação de ciclo longo e coordenação entre setor mineral, indústria automotiva e centros de pesquisa. A experiência internacional demonstra que a consolidação de cadeias tecnológicas estratégicas requer visão de Estado, previsibilidade regulatória e estímulos à inovação incremental e disruptiva.

4.3.4. Estruturas: Infraestrutura existente e necessária

O estudo demonstra que, em um cenário de longo prazo, serão necessárias infraestruturas avançadas de P&D, incluindo síntese, caracterização, bancos experimentais e capacidade de prototipagem. Além da base laboratorial, o longo prazo requer a implantação de bancos experimentais e plantas-piloto capazes de realizarem testes em condições próximas às industriais, reduzindo o risco de escalonamento tecnológico. Para o setor automotivo, será estratégica a disponibilidade de infraestrutura de ensaios de durabilidade, ciclo térmico, segurança e envelhecimento acelerado, permitindo validar materiais e componentes antes da integração em plataformas veiculares globais

4.3.5. Capacitação de capital intelectual: Competências críticas a desenvolver

No horizonte de dez anos, a consolidação de cadeias nacionais de minerais estratégicos para a indústria automotiva dependerá fortemente da formação e retenção de capital intelectual altamente qualificado, com ênfase em pesquisa fundamental e aplicada em ciência e engenharia de materiais. Será essencial aprofundar a compreensão das relações estrutura–propriedade–processo, especialmente em materiais avançados utilizados em baterias, ligas leves, magnetos permanentes, cerâmicas técnicas e semicondutores. A capacidade de correlacionar composição química, microestrutura, defeitos cristalinos e parâmetros de processamento com desempenho mecânico, térmico, elétrico e eletroquímico será determinante para reduzir riscos tecnológicos e acelerar a maturidade.

O desenvolvimento de competências críticas exigirá a integração entre metalurgia física, química de materiais, modelagem computacional multiescala e técnicas avançadas de caracterização. Além disso, a incorporação de ferramentas digitais como, por exemplo simulação preditiva, inteligência artificial aplicada à descoberta de materiais e digital twins de processos industriais tende a tornar-se diferencial competitivo na próxima década, alinhando-se às diretrizes internacionais de inovação em materiais estratégicos

4.3.6. Conexões necessárias: Parcerias com universidades, centros de pesquisa, indústria

Torna-se fundamental estruturar redes de cooperação sólidas e orientadas a resultados entre universidades, centros de pesquisa e a indústria automotiva. A análise das publicações e patentes evidencia uma liderança compartilhada entre academia e setor produtivo, o que indica ambiente propício para a formação de arranjos colaborativos mais estruturados.

Nesse contexto, recomenda-se a priorização de parcerias temáticas focadas em eixos estratégicos já identificados no estudo, motores e ímãs permanentes, baterias alternativas, catalisadores e tecnologias associadas ao hidrogênio (H₂), além de ligas metálicas avançadas. Esses consórcios devem atuar como mecanismos de aceleração tecnológica, reduzindo o intervalo entre pesquisa laboratorial, prova de conceito e validação pré-industrial. A integração precoce da indústria nos projetos de pesquisa é determinante para garantir aderência a requisitos de desempenho, custo, escalabilidade e conformidade regulatória.

4.3.7. Lacunas técnicas e de infraestrutura: Pontos críticos para viabilização

Apesar do volume expressivo de produção científica e tecnológica identificado, persiste uma lacuna crítica na infraestrutura intermediária necessária para transformar resultados acadêmicos em soluções industriais viáveis. Observa-se a ausência de ambientes estruturados de transição tecnológica, situados entre o desenvolvimento em escala de bancada (paper) e a implementação em linha-piloto, especialmente para materiais promissores associados a baterias, catalisadores e sistemas magnéticos.

Além disso, a integração sistêmica dessas novas soluções aos processos automotivos consolidados representa um desafio relevante. A introdução de novos materiais exige compatibilidade com padrões rigorosos de qualidade, custo, cadeia de suprimentos (supply) e requisitos de meio ambiente, saúde e segurança. A superação dessas lacunas demanda investimentos direcionados em infraestrutura tecnológica, plantas de demonstração e ambientes colaborativos de validação industrial, assegurando que as inovações mapeadas neste landscape possam efetivamente alcançar maturidade comercial.

4.4. Segurança de suprimento de minerais críticos: limites da abundância geológica

A abundância mineral é frequentemente vista como um indicativo de segurança de suprimento, com base na ideia de que países com grandes reservas geológicas ocupam uma posição estratégica privilegiada. No entanto, a experiência recente da transição energética e da mobilidade elétrica mostra que tanto a geração de valor quanto a segurança de abastecimento não dependem apenas dessa disponibilidade, mas também da capacidade de transformar esses recursos em insumos industriais com alto nível tecnológico.

A segurança de suprimento de minerais críticos deve, portanto, ser compreendida como um fenômeno multidimensional, que envolve não apenas a existência de reservas, mas também a capacidade de convertê-las em materiais utilizáveis, atendendo a padrões técnicos, ambientais e econômicos compatíveis com as exigências do setor automotivo global. Entre a geologia e o componente final, existem diversas etapas, como refino químico, produção de compostos intermediários, formulação de materiais e manufatura especializada, cada uma sujeita a gargalos tecnológicos, regulatórios e logísticos.

Nesse sentido, a criticidade de um mineral não decorre apenas de sua raridade natural, mas também da concentração de capacidades industriais e tecnológicas em etapas específicas da cadeia produtiva. Elementos como terras raras, grafita e silício exemplificam esse fenômeno: ainda que as reservas estejam relativamente distribuídas geograficamente, as etapas de maior valor agregado, como separação química, purificação em grau eletrônico e produção de materiais funcionais, permanecem concentradas em poucos países, criando dependências estruturais difíceis de mitigar no curto prazo.

Ainda, a segurança de suprimento está cada vez mais condicionada a fatores que vão além dos geológicos, como critérios ambientais, sociais e de governança, rastreabilidade, pegada de carbono e conformidade regulatória. Assim, a obtenção de licenças ambientais, a aceitação social da atividade mineral e o acesso à energia de baixo carbono para o processamento tornam-se elementos decisivos para transformar reservas em oferta efetiva.

Para países como o Brasil, reconhecer que abundância mineral não se traduz automaticamente em segurança de suprimento é passo fundamental para o desenho de políticas industriais mais eficazes. O fortalecimento das capacidades nacionais de processamento, a integração com cadeias industriais avançadas e o desenvolvimento de competências tecnológicas são elementos centrais para que a abundância geológica possa se converter plenamente em vantagem tecnológica e estratégica.

4.5. Segurança de suprimento de minerais críticos: limites da abundância geológica

A discussão atual sobre minerais críticos costuma indicar a disponibilidade geológica como principal critério de importância estratégica. No entanto, ao analisar as cadeias tecnológicas associadas à mobilidade automotiva, fica claro que o valor não está apenas na extração mineral. Ele depende, sobretudo, da capacidade de transformá-los em materiais funcionais, com propriedades bem controladas, desempenho previsível e integração eficiente aos produtos finais.

Na cadeia da mineração voltada à indústria automotiva, o valor econômico e tecnológico se desloca progressivamente das etapas iniciais para aquelas de maior transformação e agregação de valor. Embora a mineração seja essencial por fornecer a matéria-prima, é na engenharia de materiais que o papel estratégico se intensifica. Essa área engloba atividades como refino químico, formulação, controle da microestrutura e integração dos materiais em componentes. É justamente nessas etapas que se concentra boa parte do conhecimento crítico, das barreiras tecnológicas e dos diferenciais competitivos que sustentam o desempenho dos sistemas automotivos atuais.

Esse deslocamento torna-se particularmente evidente no caso de baterias, ímãs permanentes, catalisadores automotivos e ligas avançadas, nos quais pequenas variações de composição química, tamanho de grão, fases cristalinas ou interfaces têm impacto direto sobre densidade energética, estabilidade térmica, eficiência eletromagnética e durabilidade em condições reais de aplicação. Nesses sistemas, a competitividade não está associada apenas ao acesso à matéria-prima, mas à capacidade de controlar, de forma consistente, propriedades materiais altamente específicas.

Os dados analisados reforçam esse entendimento ao revelar que a maior parte da produção tecnológica, expressa em patentes e publicações científicas aplicadas, está concentrada no desenvolvimento de materiais e componentes automotivos, e não nas etapas de extração ou beneficiamento primário. Esse padrão indica que, embora a base mineral seja uma condição necessária, a competitividade nas cadeias globais de valor da mobilidade eletrificada depende, em grande escala, do domínio das etapas tecnológicas intermediárias e finais, onde se consolidam o conhecimento aplicado e a propriedade intelectual.

Nesse contexto, países que combinam domínio sobre a base mineral com competências em processamento avançado e engenharia de materiais tornam-se capazes de capturar parcelas significativamente maiores do valor agregado, além de exercer maior influência sobre padrões técnicos, especificações industriais e direções futuras de inovação. A engenharia de materiais, nesse sentido, funciona como elo estruturante, conectando recursos naturais a sistemas de alto desempenho.

Para países detentores de ampla base mineral, como o Brasil, essa dinâmica impõe um desafio estrutural. A exportação de minerais ou concentrados, quando não acompanhada pelo domínio das etapas de transformação em materiais avançados, limita a captura de valor econômico e tecnológico e tende a manter o país em posições periféricas nas cadeias globais de inovação. Avançar para um modelo mais integrado exige investimentos em infraestrutura de processamento, plantas-piloto, capacitação técnica e maior articulação com a indústria usuária, especialmente a automotiva.

Portanto, a partir dos dados analisados, a cadeia mineral automotiva não pode ser compreendida apenas sob a ótica da disponibilidade de recursos, devendo ser analisada de forma integrada à capacidade de geração de conhecimento aplicado, engenharia de materiais e manufatura avançada. É nessa combinação que se define a competitividade de longo prazo e a possibilidade de inserção qualificada em um setor cada vez mais orientado por desempenho, sustentabilidade e confiabilidade tecnológica.

5. Considerações finais e recomendações

O landscape tecnológico analisado evidencia que o Brasil possui base mineral capaz de sustentar posicionamento estratégico na cadeia da mobilidade eletrificada, especialmente se avançar na captura de valor em Componentes e Materiais Automotivos. A oportunidade reside na articulação entre reservas nacionais, investimentos industriais e parcerias tecnológicas estruturadas.

Os riscos associados à volatilidade de preços, concentração geográfica da oferta e gargalos técnicos reforçam a necessidade de abordagem coordenada em P&D, infraestrutura e capacitação. É importante o desenvolvimento de uma trajetória consistente para transformar potencial mineral em vantagem competitiva sustentável, acompanhada por indicadores claros de custo, desempenho, maturidade tecnológica e pegada de carbono por veículo. A estratégia nacional deve alinhar disponibilidade mineral com desenvolvimento tecnológico, promovendo internalização de processamento, consolidação de competências e inserção progressiva em tecnologias emergentes, garantindo competitividade sustentável no cenário internacional.

5.1. Síntese das principais oportunidades e riscos

A análise consolidada da base de artigos e patentes, organizada por horizontes de inovação, evidencia que a mineração estratégica ocupa posição central na geração de matérias-primas críticas para a indústria automotiva contemporânea e futura. Observa-se uma janela concreta de oportunidade para ampliação da agregação de valor na cadeia mineral, especialmente quando associada ao desenvolvimento de rotas tecnológicas voltadas a baterias, motores elétricos, sistemas magnéticos, catalisadores e ligas estruturais avançadas.

Entre as principais oportunidades identificadas destacam-se: a inserção em cadeias globais de maior intensidade tecnológica; o desenvolvimento de rotas de processamento mais eficientes e sustentáveis; a consolidação de consórcios temáticos focados em aplicações estratégicas; e o fortalecimento da integração entre mineração, transformação tecnológica e aplicação automotiva. A estruturação de infraestrutura intermediária, entre pesquisa acadêmica e validação industrial, surge como elemento-chave para converter conhecimento em vantagem competitiva.

Entretanto, o presente estudo também evidencia riscos relevantes.

A elevada dependência de minerais críticos com risco de suprimento, a concentração geográfica da produção e do domínio tecnológico, as exigências regulatórias ambientais, bem como os desafios de escalabilidade industrial, representam fatores que podem comprometer a competitividade caso não sejam estrategicamente endereçados. Soma-se a isso a limitação metodológica observada na análise geográfica das publicações, uma vez que o país de origem não necessariamente reflete o real interesse estratégico ou o local de aplicação industrial da tecnologia desenvolvida.

5.2. Direcionamentos estratégicos para P&D, investimentos e parcerias

Com base nas evidências apresentadas ao longo deste estudo, recomenda-se a adoção de uma estratégia estruturada em três eixos complementares: consolidação tecnológica no curto prazo, escalabilidade e integração no médio prazo, e posicionamento disruptivo no longo prazo.

No âmbito de P&D, é prioritário direcionar esforços para tecnologias já identificadas como estratégicas nas bases analisadas, especialmente aquelas associadas a baterias, motores e ímãs permanentes, catalisadores e ligas avançadas, garantindo evolução incremental de desempenho, redução de custos e maior eficiência no uso de minerais críticos. Paralelamente, devem ser estimuladas pesquisas voltadas a rotas alternativas de processamento e substituição parcial de materiais de maior risco estratégico.

Em termos de investimentos, destaca-se a necessidade de fortalecimento da infraestrutura tecnológica nacional, incluindo laboratórios avançados, plantas-piloto e ambientes de validação pré-industrial que reduzam a lacuna entre pesquisa científica e aplicação automotiva. A criação de estruturas intermediárias de demonstração tecnológica é fundamental para acelerar a maturidade e mitigar riscos de adoção industrial.

No que se refere às parcerias, recomenda-se a consolidação de redes cooperativas permanentes entre universidades, centros de pesquisa e indústria automotiva, estruturadas em consórcios temáticos alinhados aos principais eixos tecnológicos identificados. A integração antecipada da indústria nos projetos de pesquisa aumenta a aderência a requisitos de qualidade, custo, cadeia de suprimentos e critérios ambientais, de saúde e segurança, elevando a probabilidade de sucesso comercial.

Por fim, entende-se que esse landscape tecnológico permitirá alinhar decisões de P&D, investimentos e articulação institucional ao posicionamento competitivo desejado para a cadeia mineral aplicada à mobilidade automotiva.

5.3. Sugestão de roadmap para implementação

A análise integrada deste landscape tecnológico evidencia que a transição energética e a transformação da indústria automotiva estão reconfigurando as cadeias globais de valor, deslocando o eixo estratégico da energia fóssil para os minerais críticos e estratégicos. No contexto brasileiro, observa-se simultaneamente elevada disponibilidade geológica de diversos minerais relevantes e lacunas significativas na agregação de valor tecnológico, no refino avançado e na inserção em segmentos de maior conteúdo tecnológico. Nesse cenário, propõe-se a implementação de um roadmap que vise orientar estratégias de fomento e políticas industriais capazes de fortalecer a cadeia nacional de processamento mineral.

No curto prazo (3 anos), a prioridade estratégica deve concentrar-se na redução de assimetrias tecnológicas e no fortalecimento das bases industriais já existentes. Assim, recomenda-se direcionar instrumentos de fomento para projetos cooperativos voltados à melhoria de rotas de beneficiamento, purificação e controle de impurezas críticas, especialmente para grafita, níquel, manganês, silício e terras raras. Nesse horizonte, políticas de incentivo à verticalização parcial da produção mineral podem reduzir dependências externas e ampliar a competitividade nacional.

No médio prazo (5 anos), o foco deve migrar para o escalonamento industrial, integração de cadeias e consolidação de plataformas tecnológicas nacionais. Para isso, será fundamental estruturar políticas de incentivo ao investimento em plantas-piloto, unidades demonstradoras e infraestrutura de refino avançado, além de fomentar projetos estruturantes que integrem mineração, transformação química e indústria automotiva.

No longo prazo (10 anos), a estratégia deve buscar liderança regional em tecnologias de processamento mineral de baixo carbono e integração com economia circular. Assim, políticas de fomento devem priorizar pesquisa de fronteira, desenvolvimento de rotas eletroquímicas, uso de hidrogênio verde em processos metalúrgicos, reciclagem avançada de minerais críticos e integração digital de cadeias produtivas.

Nesse contexto, recomenda-se que o roadmap seja orientado por quatro vetores estruturantes: (i) agregação de valor mineral no território nacional; (ii) redução de vulnerabilidades em cadeias críticas para a indústria automotiva; (iii) integração entre mineração, transformação e manufatura; e (iv) sustentabilidade e competitividade internacional. Ao alinhar instrumentos de fomento, políticas industriais e prioridades tecnológicas com esses vetores, o Brasil poderá avançar da condição de exportador de commodities minerais para fornecedor estratégico de insumos tecnológicos.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário Mineral Brasileiro 2025: principais substâncias metálicas. Brasília: ANM, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_metalicos__rev_2.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário Mineral Brasileiro Interativo 2026. Brasília, DF: ANM, 2026. Disponível em: <https://app.powerbi.com/>

BIAN, J.; PATEL, J. Niobium metallurgy in advanced high strength steels for automotive lightweighting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMOTIVE MATERIALS & MANUFACTURING, 2014, Pune. Anais [...]. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2014-28-0001>.

BLOOMBERGNEF (BNEF). Electric vehicle outlook 2024. Londres: BNEF, 2024. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

CASTRO, Fernando Ferreira de; PEITER, Carlos Cesar; GÓES, Geraldo Sandoval. Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da política mineral brasileira. Rio de Janeiro: IPEA, 2022. (Texto para Discussão, n. 2868). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/items/48e51aab-4cde-4765-a379-5d53da2ac6be>. Acesso em: 10 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Minerais críticos e estratégicos para a transição energética. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-877/Caderno_Minerais_Final.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

GOODENOUGH, J. B.; PARK, K. S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective. Journal of the American Chemical Society, v. 135, n. 4, p. 1167-1176, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ja3091438>. Acesso em: 10 jun. 2026.

GUTFLEISCH, O. et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. Advanced Materials, v. 23, n. 7, p. 821-842, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201002180>. Acesso em: 10 jun. 2026.

HUND, K. et al. Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition. Washington: World Bank Group, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/4dd08d0c-ab51-4955-a464-35a95201a5eb>. Acesso em: 10 jun. 2026.

INDUSTRIAL TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE (ITRI). Global semiconductor industry. Hsinchu: ITRI, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Relatório anual de atividades 2023. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/04/IBRAM_Relatorio-Anual-2023_completo_v3.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM); CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). Minerais críticos e estratégicos no Brasil: um passaporte para o futuro. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2025. E-book. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/10/IBRAM_MINERAIS-CRITICOS-E-ESTRATEGICOS-NO-BRASIL_WEB.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global critical minerals outlook 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>. Acesso em: 10 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). The role of critical minerals in clean energy transitions. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 10 jun. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Geopolitics of the energy transformation: critical materials. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Geopolitics_energy_transition_critical_materials_2023.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

KIM, H. C.; WALLINGTON, T. J. Life-cycle energy and greenhouse gas emission benefits of lightweighting in automobiles. Environmental Science & Technology, v. 47, n. 12, p. 6089-6097, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es3042115>. Acesso em: 10 jun. 2026.

PAINEL INTERGOVERNMENTAL SOBRE MUDANÇAS DO CLIMA (IPCC). Climate change 2023: synthesis report. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>. Acesso em: 10 jun. 2026.

TARASCON, J.-M.; ARMAND, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature, Londres, v. 414, n. 6861, p. 359-367, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35104644>. Acesso em: 10 jun. 2026.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2024. Reston: U.S. Geological Survey, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2024>. Acesso em: 10 jun. 2026.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2025. Reston: U.S. Geological Survey, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2025>. Acesso em: 10 jun. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2024/1252, de 11 de abril de 2024. Estabelece um quadro parNEOa assegurar um aprovisionamento seguro e sustentável de matérias-primas críticas. Jornal Oficial da União Europeia, 17 abr. 2024. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

WORLD AUTOSTEEL. Advanced high-strength steels (AHSS) application guidelines. Versão 7.0. 2021. Disponível em: <https://ahssinsights.org/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

NEOMINERAÇÃO

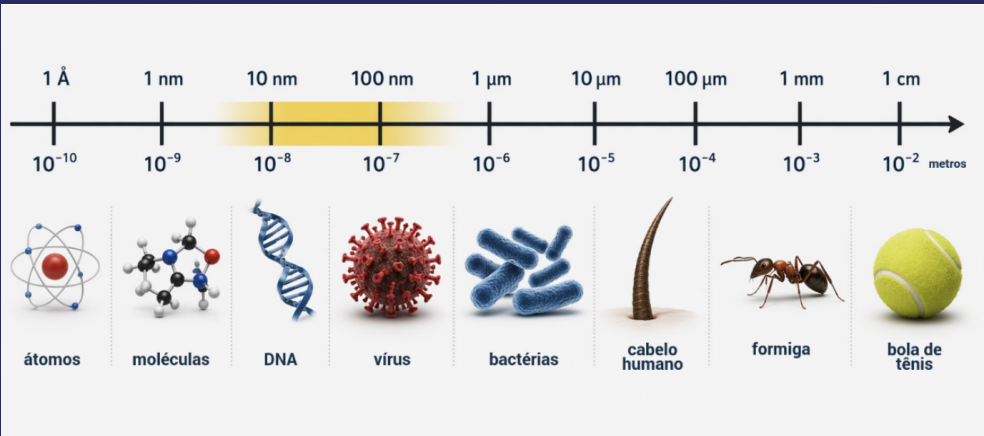
| Sumário

1. Nanotecnologia	250
2. Mineração	260
3. Mineração Sustentável	273
4. Minerais Críticos e Estratégicos	277
5. Neomineração	290
Referências Bibliográficas	296

1. Nanotecnologia

A nanotecnologia pode ser definida como a manipulação da matéria em escala atômica e molecular para criar materiais e sistemas com propriedades novas, superiores e mais competitivos. A demonstração da escala dimensional é apresentada na Figura 1 e ilustra como as nanoestruturas (< 100 nm) podem ser representadas. A nanotecnologia está evoluindo rapidamente e se tornando parte de quase todos os campos relacionados a materiais (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; FERREIRA, 2018; MEKUYE; ABERA, 2023; SIQUEIRA-BATISTA et al., 2010).

Figura 1 - Representação das estruturas em nanoescala.

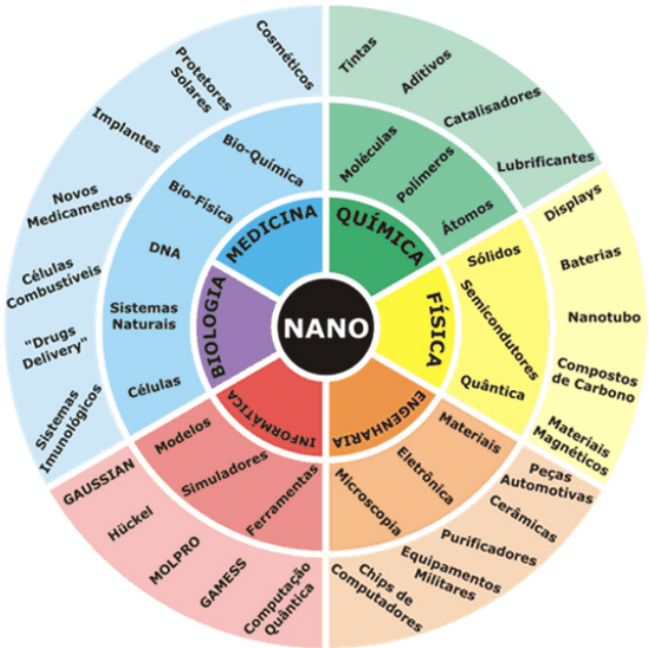


Fonte: Elaborado pela autora com apoio de IA generativa, adaptado de escala comparativa de dimensões micro e nanométricas.

A característica multidisciplinar da nanotecnologia permite sua atuação na medicina, eletrônica, energia, cosméticos, agricultura, tintas, catalisadores e sensores, dentre outros materiais, permitindo inovações como materiais mais leves e resistentes. A nanotecnologia é uma tecnologia estratégica, transversal e disruptiva dedicada à compreensão, controle e utilização das propriedades da matéria na nanoescala, e se acomoda facilmente em todas os setores econômicos da sociedade (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; FERREIRA, 2018; MEKUYE; ABERA, 2023).

A Nanotecnologia resulta da sedimentação de conhecimento científico em áreas diversas, e para a qual contribuíram decisivamente avanços tecnológicos recentes (MARTINS; TRINDADE, 2012). Algumas áreas de inserção da nanotecnologia são resumidas na Figura 2, e permite vislumbrar a dimensão das aplicações e frentes de atuação. Fica evidente a interdisciplinaridade presente e a contribuição que essa diversidade representa em termos de benefícios para a ciência, para a tecnologia e para a sociedade (FERREIRA, 2018).

Figura 2 - Áreas de inserção da Nanotecnologia.



A nanotecnologia abrange a síntese, a engenharia e a aplicação de nanomateriais. Devido às aplicações inovadoras dos nanomateriais para a próxima geração industrial, a nanotecnologia tem atraído muito interesse. A relevância adquirida é significativa e permite o desenvolvimento de novos métodos e técnicas, com aplicabilidade em diferentes processos industriais. Ao investigar e manipular a matéria em nanoescala, torna-se possível produzir artefatos e técnicas capazes de interferir em diferentes sistemas (MEKUYE; ABERA, 2023; SIQUEIRA-BATISTA et al., 2010).

A intervenção da nanotecnologia possibilita o desenvolvimento de novos materiais, com novas propriedades e novas aplicações tecnológicas. Os resultados das aplicações são questões nas agendas de discussões mundiais e criou uma corrida em países, como Estados Unidos e Japão bem como, na União Europeia, em busca do desenvolvimento científico e tecnológico, no qual o Brasil também deve estar inserido (FERREIRA, 2018; MARTINS; TRINDADE, 2012).

1.1. Nanomateriais

Os nanomateriais são a base da nanotecnologia e são estruturas com pelo menos uma dimensão entre 1 e 100 nm, apresentando propriedades únicas e distintas daquelas encontradas em suas formas micro e macroscópicas. As propriedades dos nanomateriais podem ser ajustadas por meio do controle do tamanho, forma, condições de síntese e funcionalização adequada. Devido a essas características, os nanomateriais são cruciais em diversas aplicações, e de acordo com sua composição estrutural, podem ser divididas basicamente em três grupos: orgânicas, inorgânicas e à base de carbono, conforme Tabela 1 (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MEKUYE; ABERA, 2023; SIQUEIRA-BATISTA et al., 2010).

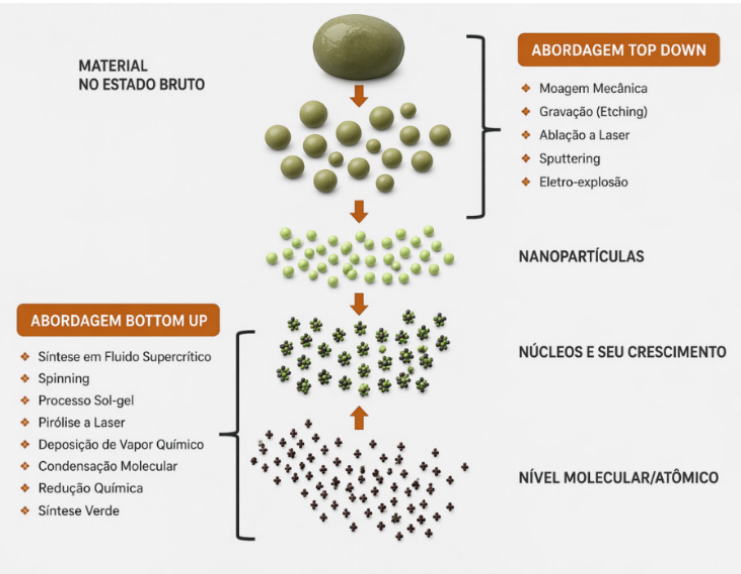
Tabela 1 - Classificação dos nanomateriais de acordo com sua composição estrutural.

Nanomaterial	Exemplos	Características
Orgânico	Lipossomas, dendrímeros, micelas e ferritina	Micelas e lipossomas são estruturas ocas, sendo sensíveis ao calor, à radiação eletromagnética e à luz; A superfície dos dendrímeros é revestida por inúmeras extremidades de cadeia que podem realizar reações químicas específicas;
Inorgânico	Metálico: alumínio (Al), cádmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), ouro (Au), ferro (Fe), chumbo (Pb), prata (Ag) e zinco (Zn)-	Devido aos seus efeitos quânticos e à alta relação superfície/volume, apresentam sensibilidade à radiação UV-VIS, além de propriedades elétricas, catalíticas, térmicas, ópticas e antibacterianas;
	Óxido metálico: dióxido de silício (SiO ₂), óxido de titânio (TiO ₂), óxido de zinco (ZnO), trióxido de alumínio (Al ₂ O ₃), pentóxido de nióbio (Nb ₂ O ₅), pentóxido de tântalo (Ta ₂ O ₅), dióxido de estanho (SnO ₂)	Apresentam propriedades elétricas, ópticas, térmicas e magnéticas que diferem drasticamente do material em escala micrométrica; Possuem alta atividade catalítica e fotocatalítica, efeito superparamagnético, ação antimicrobiana, resistência térmica e mecânica;
	Cerâmico: carbetos de silício (SiC), carbetos de tungstênio (WC), carbetos de boro (B ₄ C), silicatos de zircônio (ZrSiO ₄), carbonato de cálcio (CaCO ₃)	Podem ser usadas em aplicações como catálise, fotocatalise, fotodegradação de corantes e aplicações de imagem;
À base de carbono	Nanotubos de carbono, grafeno, fullerenos, nanofibras de carbono e negro de fumo	Usados para reforço estrutural, são termicamente condutores ao longo do comprimento e não condutores transversalmente.

Fonte: Elaboração própria (2026).

Duas abordagens principais são utilizadas para a síntese de nanomateriais, representados na Figura 3. O método top down, também conhecido como método destrutivo, caracteriza-se por decompor materiais sólidos grandes (bulk) em materiais menores, que em última instância, se transformam em nanomateriais. O método bottom-up, também conhecido como método construtivo, envolve a síntese e a construção do nanomaterial a partir de átomos, clusters e moléculas (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MEKUYE; ABERA, 2023).

Figura 3 - Síntese de nanomateriais por meio de abordagens top-down e bottom-up.



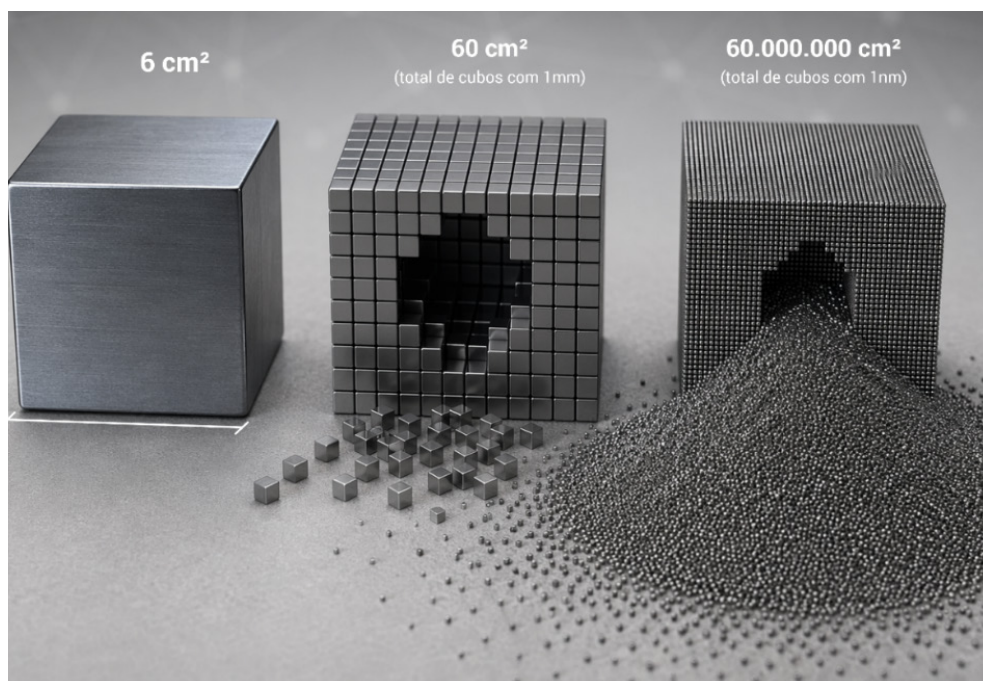
A relação entre a área da superfície e o volume de uma nanopartícula tem um impacto significativo em seu desempenho e suas propriedades. A área superficial dos nanomateriais é substancialmente maior em comparação com os seus equivalentes micro e macroscópicos. Os átomos da superfície, por sua vez, têm alta energia superficial, o que aumenta consideravelmente a energia e reatividade superficial em nanoescala (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MEKUYE; ABERA, 2023).

Como consequência da diminuição do tamanho de partícula dos materiais, verifica-se um aumento da área superficial por volume (Figura 4). Por exemplo, para um cubo com aresta de 1 cm, tem-se um volume de 1 cm³, e uma área superficial de 6 cm². Ao reduzir a aresta do cubo para 1 mm, para o mesmo volume de 1 cm³, existem 1000 cubos cuja área superficial totaliza 60 cm². Se a aresta do cubo for reduzida para 1 nm, para o volume de 1 cm³, existem 10²¹ cubos, e a área superficial resultante é 60.000.000 cm² (MARTINS; TRINDADE, 2012; MEKUYE; ABERA, 2023).

1.2. Propriedades dos Nanomateriais

Os nanomateriais apresentam propriedades distintas das propriedades dos sólidos cristalinos em escalas micrométrica, devido a efeitos de tamanho e de superfície que se tornam especialmente evidentes para dimensões menores que 100 nm. Portanto, as propriedades dos nanomateriais podem ser ajustadas através da variação e do controle do tamanho do nanomaterial (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MARTINS; TRINDADE, 2012; MEKUYE; ABERA, 2023).

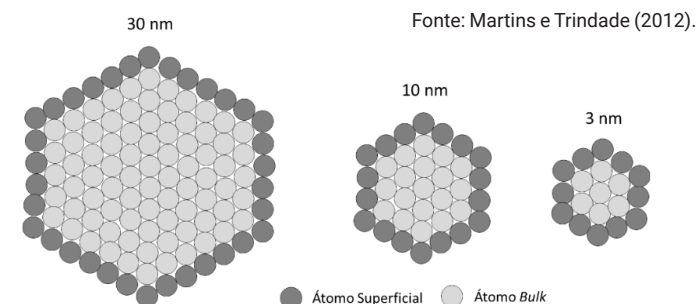
Figura 4 - Evolução da área superficial com a redução da aresta do cubo.



Fonte: Elaborado pela autora com apoio de IA generativa,

Adicionalmente, a porcentagem de átomos na superfície, em relação ao número total de átomos na partícula, aumenta quando o tamanho da partícula é reduzido, conforme ilustrado na Figura 5. Para uma nanopartícula com 30 nm de diâmetro, 5% dos átomos encontram-se na superfície, enquanto para uma nanopartícula de 10 nm, 20% dos átomos encontram-se na superfície, e para uma nanopartícula de 3 nm de diâmetro, aproximadamente metade dos átomos do nanomaterial são superficiais (MARTINS; TRINDADE, 2012; MEKUYE; ABERA, 2023).

Figura 5 - Evolução da proporção de átomos superficiais em relação aos átomos bulk com a redução do tamanho de partícula.



Dentre uma série de propriedades, algumas propriedades-chave podem ser obtidas ajustando-se os tamanhos e as morfologias dos nanomateriais. De modo geral, esse conjunto de características tornaram os nanomateriais valiosos para uma ampla gama de aplicações, aumentando substancialmente o desempenho de diversos dispositivos e materiais (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021).

O aumento da reatividade superficial e da atividade catalítica devido à elevada área superficial dos nanomateriais são exemplos bem conhecidos. As propriedades mecânicas dos nanomateriais, tais como resistência, dureza e tenacidade, são consideravelmente melhoradas devido à redução de defeitos cristalográficos (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MARTINS; TRINDADE, 2012; MEKUYE; ABERA, 2023).

O livre caminho médio dos elétrons nos metais é de aproximadamente 10 a 100 nm e, devido a isso, espera-se que os efeitos eletrônicos e ópticos nessa escala sejam ampliados. Um elemento não magnético em escala micrométrica pode se tornar magnético em escala nanométrica. Alguns nanomateriais possuem propriedades antivirais, antibacterianas e antifúngicas, apresentando excelente capacidade para combater doenças relacionadas a patógenos (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MEKUYE; ABERA, 2023).

Os efeitos quânticos são mais pronunciados em escala nanométrica, no entanto, a dimensão na qual esses efeitos se manifestam depende da natureza do material. Uma condutividade térmica e elétrica superior pode ser exibida em escala nanométrica em comparação a escala micro e macroscópica. Os nanomateriais podem aumentar a condutividade em cerâmicos e reduzir a resistência elétrica em metais (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MEKUYE; ABERA, 2023).

Devido ao confinamento eletrônico, as bandas de energia são substituídas por estados de energia discretos, fazendo com que os materiais condutores se comportem como semicondutores ou isolantes. Como resultado do confinamento quântico em nanomateriais, a emissão de luz visível pode ser ajustada variando-se as dimensões em nanoescala. A temperatura de fusão de um material bulk não depende do seu tamanho, mas, para nanomateriais, a temperatura de fusão diminui à medida que o tamanho da partícula diminui, devido à maior proporção de átomos superficiais (MEKUYE; ABERA, 2023).

1.3. Aplicações dos Nanomateriais

As pesquisas em nanomateriais não se concentram apenas no desenvolvimento de nanomateriais com formatos aleatórios, mas sim, em materiais com nanoarquiteturas controladas para impulsionar seu desempenho em aplicações específicas. Muitos campos de aplicação merecem destaque e são apresentados na Figura 6 (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021; MEKUYE; ABERA, 2023).

Figura 6 - Campos de aplicação com nanomateriais.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de representação esquemática das aplicações da

A catálise é uma das principais aplicações de nanomateriais à base de metais. Uma gama de nanomateriais está sendo considerada para o desenvolvimento de eletrodos que possam ser aplicados com eficácia na eletrólise da água, baterias e células solares. A alta demanda por energia tem levado a uma maior pressão para melhorar o desempenho e a vida útil das baterias. Materiais nanoestruturados à base de óxidos metálicos também são materiais de eletrodo promissores para uso em dispositivos de armazenamento de energia de alto desempenho (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021).

Materiais de eletrodo decorados com nanomateriais à base de metal ou óxido metálico têm demonstrado melhores respostas e seletividade na determinação de diversos analitos em comparação com materiais de eletrodo convencionais. As nanoestruturas metálicas atuam como eletrocatalisadores e condutores eletrônicos, proporcionando rápida transferência de elétrons entre os transdutores e as moléculas do analito (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021).

O desenvolvimento de catalisadores em nanoescala ou catalisadores nanoestruturados emergiu como uma área de pesquisa relevante devido às suas atividades catalíticas excepcionalmente altas, permitindo que as reações sejam realizadas de forma mais eficaz e eficiente. Materiais em nanoescala fornecem características de superfície com um número grande de sítios ativos e alta área superficial, favorecendo a termodinâmica e a cinética de reações heterogêneas (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021).

Nanomateriais à base de metais e óxidos metálicos têm sido usados para o desenvolvimento de sensores, para substituir os instrumentos complexos e caros que são convencionalmente usados para a detecção de analitos. Sensores semicondutores à base de óxidos metálicos são usados principalmente para a detecção de gases tóxicos, inflamáveis e de escape (BAIG; KAMMAKAKAM; FALATH, 2021).

A incorporação de nanomateriais à base de óxidos metálicos em matrizes metálicas, cerâmicas e poliméricas tem sido utilizada como uma estratégia para aprimorar propriedades específicas, tais como, resistência mecânica e resistência térmica. Tais estratégias possibilita o desenvolvimento de produtos com melhor desempenho, redução de massa, maior durabilidade e aplicações de alto valor agregado.

2. Mineração

Qualquer atividade agrícola ou industrial, no campo da metalurgia, da indústria química, de energia, da construção civil ou do cultivo da terra, utiliza os minerais ou seus derivados. A cada dia é necessário maior quantidade de matéria-prima para atender às crescentes necessidades globais. Como consequência, o século XXI testemunha um novo “boom” mineral, e o Brasil, em decorrência, atravessa um período de alta atividade no setor de mineração. A área de engenharia mineral no país ressurgiu com maior dinamismo nos últimos anos, onde o desenvolvimento de rotas tecnológicas específicas para determinados minérios pode catalisar uma nova era no Brasil (LUZ; LINS, 2010).

2.1. Operações de Mineração

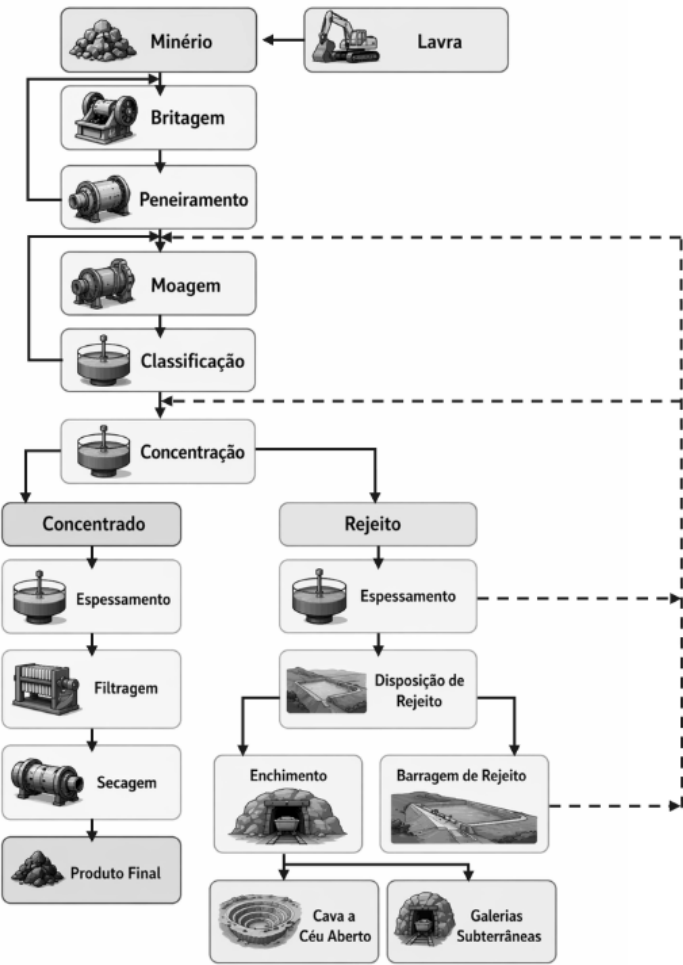
As operações em uma empresa de mineração são classificadas em várias etapas, que se subdividem nas operações minerais e nos processos unitários. A extração do minério de uma jazida é realizada por meio de operações de lavra (a céu aberto ou subterrânea) na mina, onde o produto da mina, o minério lavrado, o ROM (run-of-mine), torna-se alimentação da usina de tratamento (LUZ; LINS, 2010; OLIVEIRA; SILVA, 2024).

O produto da detonação não pode ser cominuído até uma fração muito fina, de modo que seu aproveitamento seria prejudicado nas etapas subsequentes e, portanto, existe uma fragmentação ideal. O desmonte de rocha é a operação de fragmentação do maciço rochoso, que se encontra na natureza com estrutura coesa e, geralmente, elevada tenacidade. Após o desmonte, o maciço rochoso fragmentado é conduzido para as outras operações e processos unitários como britagem e moagem (OLIVEIRA; SILVA, 2024).

O conceito Mine to Mill (da mina à moagem) caracteriza-se por conectar todas as etapas produtivas do minério, desde a sua extração, até a obtenção do produto final após as etapas de beneficiamento. O objetivo é reduzir o nível de trabalho necessário para obter o bem mineral, integrando o produto de desmonte com as etapas subsequentes. Esse método busca aperfeiçoar as operações mineiras. A aplicação do método cresce na mineração com o intuito de minimizar as operações (OLIVEIRA; SILVA, 2024).

O Tratamento ou Beneficiamento de Minérios consiste em operações visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma das partículas de minério. Também pode ser definido como um processamento no qual os minerais podem sofrer alterações físicas e químicas, resultantes de decomposição térmica ou de reações típicas geradas pela presença do calor (LUZ; LINS, 2010). A figura 7 ilustra as principais etapas de beneficiamento de minérios.

Figura 7 - Fluxograma típico de tratamento de minérios.



A aglomeração de finos de minérios (briquetagem, sinterização e pelletização), a ustulação (processo pirometalúrgico de oxidação de sulfetos metálicos, aquecidos em atmosfera rica em oxigênio a temperaturas abaixo de seu ponto de fusão) e a calcinação são consideradas, dentro desse conceito mais abrangente, como tratamento de minérios. As operações de concentração (separação seletiva de minerais) baseiam-se nas diferenças de propriedades (densidade, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades químicas e superficiais, cor, radioatividade, forma, etc.) entre o mineral de interesse dos demais minerais. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse (LUZ; LINS, 2010).

Para um minério ser concentrado, é necessário que os minerais estejam fisicamente liberados. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica. Para se obter a liberação do mineral, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho (britagem, moagem, cominuição), que pode variar de centímetros até micrômetros. Para evitar uma cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação, nos circuitos de cominuição. O objetivo usual do processo de moagem é a separação por espécie de partículas para liberação do mineral de interesse (LUZ; LINS, 2010; SUDÁRIO, 2010).

Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos à operação de separação das espécies, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito. O termo concentração significa, remover a maior parte do material que não é de interesse (rejeito), presente em grande proporção no minério (LUZ; LINS, 2010).

A purificação, por sua vez, consiste em remover do minério concentrado os minerais contaminantes que ocorrem em pequena proporção. Nesta etapa, se os minerais também já estiverem em escalas reduzidas, particularmente submicrométrica e nanométrica, com maior área superficial disponível, os processos de purificação podem ser facilitados. Comumente, as operações de concentração são realizadas a úmido. Entretanto, antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidro ou pirometalúrgicos, é necessário eliminar parte da água do concentrado, através de desaguamento e secagem (LUZ; LINS, 2010).

Há uma significativa demanda por água no beneficiamento ou tratamento de minérios. A flotação tem sido considerada como a grande vilã do tratamento de minérios, devido ao uso intensivo de água, uso de reagentes químicos ou geração de efluentes líquidos e de rejeitos com altas concentrações de água. Ao longo dos anos, algumas técnicas foram incorporadas ao processo de flotação visando aumentar a sua eficiência e tem sido regra mundial a recirculação da água utilizada mesmo quando esta água exija um tratamento antes de ser reintroduzida no processo (SALUM, [s.d.]).

O processo de beneficiamento, que influenciará na forma de disposição de rejeitos, não depende apenas da decisão por processos de menor impacto ambiental, mas também, da geologia dos depósitos minerais. Os minérios que vêm sendo lavrados há muitos anos têm progressivamente teor mais baixo e granulometrias mais finas. Tais características são responsáveis por um beneficiamento mais complexo, com presença de água e reagentes químicos, maior gasto de energia e, conseqüentemente, maiores desafios para a disposição dos rejeitos gerados (SALUM, [s.d.]).

2.2. Diretrizes Políticas e Ambientais na Mineração

O tratamento de minérios, como toda e qualquer atividade industrial, está dirigido para o lucro. Há, porém, a necessidade de conservação dos recursos minerais, por se tratar de bens não renováveis. As reservas minerais conhecidas são limitadas e não se deve permitir o seu aproveitamento predatório. É possível dizer que “mineral dá apenas uma safra”. Por isso, o uso da tecnologia pode contribuir muito para aumentar o rendimento e a eficiência do processo de mineração, preservando assim os recursos minerais, e, ao mesmo tempo, reduzindo a quantidade de resíduos e passivos ambientais.

Independentemente do porte dos empreendimentos de mineração, dos bens minerais produzidos e da região de sua inserção, eles estarão sempre sujeitos ao licenciamento ambiental. Conhecer não apenas todas as variáveis do corpo mineralizado, mas, também, as características químicas, mineralógicas e físicas dos resíduos gerados, bem como as características da biodiversidade da área, existência de impeditivos legais, tem um papel-chave na sua sustentabilidade. Geralmente, a atividade de mineração envolve modificações em diferentes meios, com destaque para a disposição de rejeitos em barragens e pilhas, poluição atmosférica por material particulado, emissão de poluentes e intervenções nos recursos hídricos (SALUM, [s.d.]).

Desde 1986, com o surgimento da 1ª Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (Resolução 01/86), a mineração é considerada uma atividade modificadora do meio ambiente e, seu exercício dependerá da aprovação pelo órgão ambiental competente de estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto ambiental – RIMA (art. 2º Caput e alínea IX). Esse enquadramento da mineração como atividade cujo exercício dependerá de aprovação do órgão ambiental competente é posteriormente reforçado e detalhado na Resolução CONAMA 237/2004 (SALUM, [s.d.]).

A incorporação dos critérios ambientais, sociais e de governança contribui para reduzir riscos e capturar oportunidades, aumentando a previsibilidade do empreendimento e a sustentabilidade do negócio. Para isso, a incorporação de tais critérios deve ser considerada em todo ciclo de vida do empreendimento, desde as fases iniciais do desenvolvimento dos projetos, até a sua fase final (SALUM, [s.d.]).

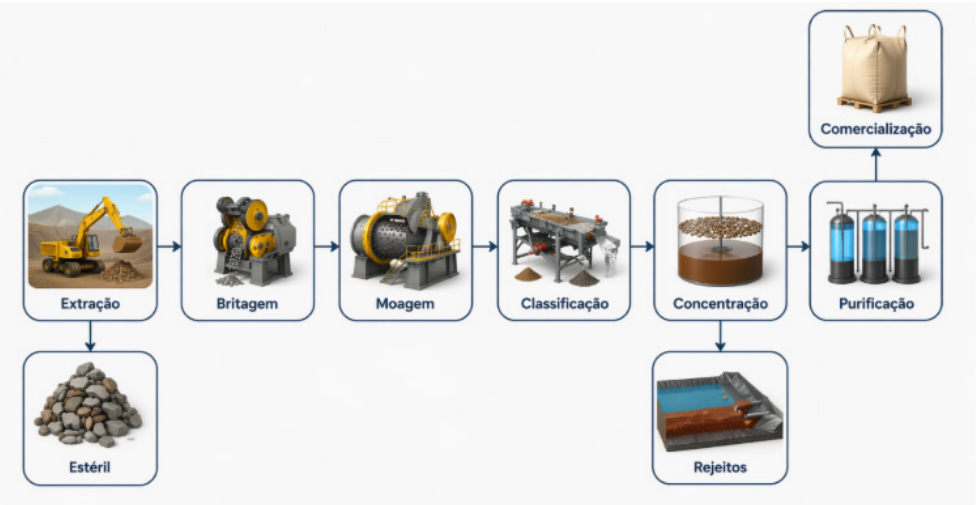
2.3. Resíduos de Mineração

A atividade mineradora é considerada a maior produtora mundial de resíduos, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas por ano, dos quais 14 bilhões são rejeitos constituídos majoritariamente por partículas menores que 150 µm. O gerenciamento de resíduos de mineração é um aspecto fundamental para promover a sustentabilidade e a segurança operacional. Considerando as novas diretrizes da NBR 10004:2024, as empresas devem revisar seus processos de avaliação de resíduos e, quando necessário, reclassificar materiais e implementar novos processos internos. Para atender às exigências legais e a busca por sustentabilidade, a adoção de práticas inovadoras no gerenciamento de rejeitos e o aprimoramento das técnicas de gestão torna-se indispensável (BVP ENGENHARIA, 2025; CÂMARA TÉCNICA DE MEIO AMBIENTE, 2021).

A origem dos resíduos da mineração está diretamente relacionada às fases operacionais, resultando em um volume significativo de subprodutos, os quais resultam da separação entre o que tem valor comercial (minério) e o que é considerado excedente, indesejado ou sem valor econômico (resíduo) (MANAVIPARAST et al., 2024; MINAX, [s.d.]). Com base em fatores como composição mineralógica da jazida, condições de mercado e tecnologias disponíveis de beneficiamento, os resíduos de mineração são divididos em dois grupos principais: estéreis e rejeitos (Figura 8) (BVP ENGENHARIA, 2025).

Cada tipo de resíduo apresenta características distintas, os quais exigem soluções específicas para sua gestão. A viabilidade de reaproveitamento depende de estudos, análises, e, muitas vezes, do desenvolvimento de novas tecnologias. Uma abordagem eficiente exige planejamento desde o início do projeto, integração entre áreas técnicas e compromisso com a sustentabilidade (MINAX, [s.d.]).

Figura 8 - Principais etapas do processo de mineração, geração de estéril e rejeito.



Fonte: Elaborado pela autora com apoio de IA generativa, adaptado de representação esquemática do processo de beneficiamento mineral.

Os estéreis são materiais removidos (escavados), gerados pelas atividades de extração (lavra) da área de interesse, produzidas no decapeamento da jazida e não possuem minerais úteis ou valor econômico imediato para o empreendimento. São compostos basicamente por fragmentos de rochas ou solos removidos para acessar o minério. Por serem mais volumosos e menos contaminantes, podem ser usados na recomposição de paisagens ou obras de infraestrutura, mas sua disposição, geralmente, é realizada em pilhas. Embora não apresentem complexidade de manejo, a gestão adequada do estéril é igualmente importante para evitar a degradação ambiental (BVP ENGENHARIA, 2025; CÂMARA TÉCNICA DE MEIO AMBIENTE, 2021; GEMDRA, 2024; MINAX, [s.d.]; VERTOWN, 2025).

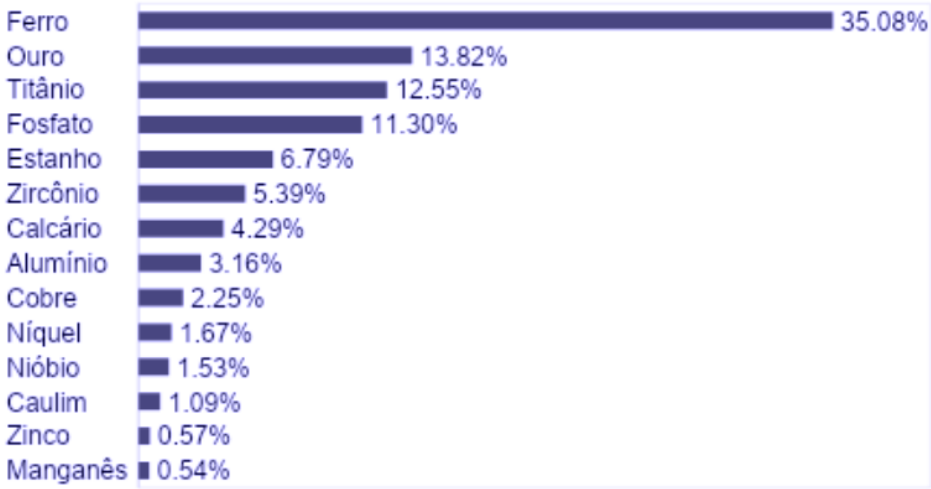
Os rejeitos, são materiais descartados provenientes do processo de beneficiamento e contêm pequenas quantidades do material de interesse, mas que não atendem aos parâmetros exigidos, ou, são mais difíceis de serem separados. Esses resíduos podem incluir uma variedade de componentes, como partículas de minério, água e produtos químicos utilizados no processo de beneficiamento. Os rejeitos, também chamados de lama ou lodo, em geral, consistem em partículas finas em suspensão e requerem contenção em barragens. Muitas vezes esses rejeitos estão associados a problemas de contaminação e, portanto, a gestão eficiente dos rejeitos é essencial para minimizar os impactos ambientais e garantir a segurança das operações de mineração (BVP ENGENHARIA, 2025; CÂMARA TÉCNICA DE MEIO AMBIENTE, 2021; GEMDRA, 2024; MINAX, [s.d.]; VERTOWN, 2025).

Uma parte substancial dos materiais extraídos das operações de mineração acaba como resíduo, a qual varia dependendo do tipo de mineração, do minério extraído e da eficiência do processo de extração. A produção anual estimada de resíduos sólidos de mineração é de 20 a 35 bilhões de toneladas, ressaltando a escala dos resíduos produzidos pelas operações de mineração em todo o mundo (MANAVIPARAST et al., 2024; MINAX, [s.d.]).

O Brasil figura como uma das grandes potências minerais do mundo. A magnitude da dotação mineral brasileira é traduzida pela produção de mais de 70 substâncias minerais que, segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), atingiu o valor de 339 bilhões de reais em 2021. A geração de rejeitos é inerente à atividade da mineração e está relacionada à natureza da jazida (localização do corpo mineralizado), à concentração do mineral de minério contido e ao processo de lavra e beneficiamento empregados (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2022).

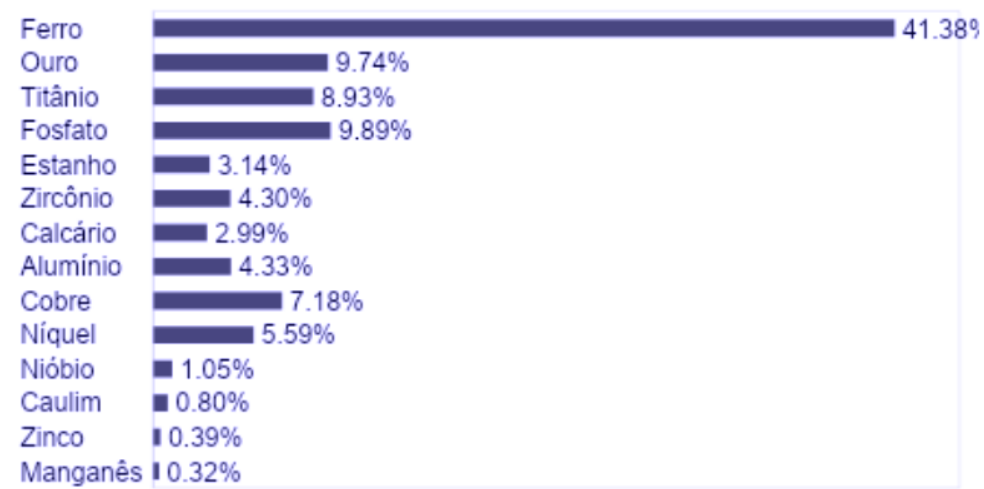
Em 2017, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) estimou que no período de 2000 a 2014 foram acumulados cerca de 4,86 bilhões de toneladas de rejeitos, gerados por 15 das cerca de 70 substâncias minerais produzidas no Brasil. Em outro levantamento realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em 2012, foram selecionadas 14 substâncias minerais produzidas no Brasil, onde foi contabilizado o volume de rejeito gerado entre 1996 e 2005 e estimado o crescimento desse volume para o período entre 2010 a 2030. As 14 substâncias, juntas, produziram de 1996 a 2005 um total de 2.179.975.000 toneladas de rejeito (Figura 9). De acordo com a pesquisa, a estimativa de rejeitos acumulados entre 2010 e 2030 seria de 11.409.877.000 toneladas (Figura 10) (EY BRASIL, 2025; SALUM, [s.d.]).

Figura 9 - Contribuição percentual por substância gerada entre 1996-2005 no Brasil considerando 2.179.975.000 toneladas de rejeitos analisadas



Fonte: Silva, Viana e Cavalcante (2012).

Figura 10 - Contribuição percentual por substância analisada das 11.409.877.000 toneladas de rejeitos gerados projetados para o período 2010-2030.



Fonte: Silva, Viana e Cavalcante (2012).

Tecnologias pouco eficientes de separação contribuem para o aumento da quantidade de resíduos. Estudos afirmam que entre 97 e 99% do material extraído em operações de mineração acaba como rejeito após o beneficiamento. Isso significa que, na prática, apenas de 1 a 3% do minério bruto se converte em produto comercial, reforçando a necessidade urgente de repensar os métodos não apenas de gestão de resíduos e de estratégias de reaproveitamento, mas também, de otimização da eficiência do próprio processo de mineração (MINAX, [s.d.]).

Durante as etapas de processamento há uma limitação: o tamanho de partícula. Embora a moagem até escalas micrométricas seja suficiente para a liberação de boa parte dos minerais de interesse, sabe-se que ainda fica uma fração significativa do elemento de interesse contido no interior desses fragmentos minerais. Sendo assim, muito do material que acaba sendo destinado como estéril ou rejeito, ainda contém minerais passíveis de separação.

Com tecnologias modernas de moagem e cominuição, seria possível fragmentar ainda mais estes minérios, indo até escalas nanométricas, nas quais seria possível extrair, além de uma quantidade adicional do mineral alvo, outros minerais associados, de igual importância. Esta estratégia tornaria o processo de mineração mais eficiente, reduzindo significativamente a quantidade de resíduo “estéril” e “rejeito”, que na realidade, ainda contém muito mineral útil. O que falta, é a implementação de tecnologias e nanotecnologias adequadas para otimizar a eficácia e o rendimento da mineração.

2.4. Composição dos Resíduos de Mineração

A composição dos resíduos de mineração varia amplamente dependendo do tipo de minério e dos métodos de extração utilizados, podendo conter, além dos minerais, metais pesados e produtos químicos de processamento. O tamanho das partículas pode variar de muito fino a partículas do tamanho de cascalho. As fases minerais nos resíduos de mineração podem ser categorizadas em dois grupos principais: fases primárias (reagidas e não reagidas) e fases secundárias (precipitadas e intemperizadas). Essas distinções são cruciais para a compreensão da evolução mineralógica dos resíduos e seu potencial impacto ambiental (MANAVIPARAST et al., 2024).

As fases primárias não reagidas são as fases minerais que existiam originalmente no minério ou na rocha extraída, e permanecem praticamente inalterados durante a moagem e o processamento do minério, como minerais de silicato e minerais sulfetados primários. Já, as fases primárias reagidas são fases minerais que sofreram algum grau de alteração ou reação durante o processo de mineração e beneficiamento, como minerais sulfetados que podem oxidar para formar minerais sulfatados secundários (MANAVIPARAST et al., 2024).

As fases secundárias precipitadas formam-se após a deposição de rejeitos no ambiente, e frequentemente resultam de reações químicas entre os rejeitos, a água e outros elementos, tais como hidróxidos. A exposição à água da chuva e às flutuações de temperatura pode levar à lixiviação de componentes solúveis, à transformação de minerais e à formação de novos produtos de intemperismo, resultando em fases secundárias intemperizadas, como argilominerais e óxidos (MANAVIPARAST et al., 2024).

Ainda, de acordo com sua composição química e estrutura cristalina, os minerais podem ser agrupados em quatro classes principais, conforme **Tabela 2** (MANAVIPARAST et al., 2024).

Tabela 2 - Classes principais de minerais, de acordo com sua composição química e estrutura cristalina do minério.

Classe	Exemplos
Minerais de silicato	Compostos principalmente de silício (Si) e oxigênio (O) combinados com vários cátions, como alumínio (Al), ferro (Fe), magnésio (Mg) e outros; incluem feldspatos, quartzo, micas, anfibólios e piroxênios
Minerais sulfetados	Compostos de enxofre (S) combinado com cátions metálicos; frequentemente se formam em ambientes hidrotermais e estão associados a depósitos de minério; incluem pirita, galena e calcopirita
Minerais de carbonato	Caracterizados pelo íon carbonato (CO3 2-) como bloco de construção fundamental; compostos principalmente de carbono, oxigênio e vários cátions; incluem calcita e dolomita
Minerais de óxido	Compostos principalmente de oxigênio (O) combinado com cátions metálicos; geralmente se formam como resultado do intemperismo de outros minerais; incluem magnetita, hematita e cassiterita

Fonte: Elaboração própria (2026).

Há uma ampla variabilidade na composição dos resíduos de mineração provenientes de diferentes locais, onde, uma abordagem multifacetada pode ser implementada, com foco na caracterização, classificação, tratamento e diretrizes regulatórias. O desenvolvimento de um sistema de classificação baseado nas propriedades químicas e físicas dos resíduos pode categorizá-los em diferentes tipos, cada um adequado para aplicações específicas. Em alguns casos, tratamentos específicos podem alterar as propriedades físicas e químicas dos resíduos, tornando-os mais adequados para determinadas aplicações. Ao implementar tais estratégias, a variabilidade na composição dos resíduos de mineração pode ser gerenciada, permitindo seu uso padronizado e seguro em diferentes aplicações (MANAVIPARAST et al., 2024).

Desta forma, a caracterização dos resíduos de mineração é essencial para a compreensão completa de suas propriedades e seus potenciais. As composições químicas e elementos associados a diversos resíduos de mineração no mundo são apresentadas na Tabela 3 (MANAVIPARAST et al., 2024). Embora seja apresentado somente um exemplo para o Brasil (minério de ferro), existem muitos elementos associados aos minerais alvo, sendo que na maioria, a maior proporção é de SiO2. E ainda, no caso específico do minério de ferro no Brasil, no “resíduo”, ainda há um teor significativo de Fe2O3, o qual poderia passar por um beneficiamento secundário, ser extraído e separado, e assim, fazer parte do material comercializado, e não simplesmente deixado nas barragens de rejeito, sem qualquer valor técnico ou comercial.

Tabela 3 - Composição química de diversos resíduos de mineração no mundo.

Resíduo de mineração	País	Óxido (%)																			
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	V ₂ O ₃	V ₂ O ₅	SO ₂	TiO ₂	SO ₃	ZnO	MnO	CuO	BaO	PbO	LOIa	Outros
Cobre	China	58,50	10,8	13,30	5,40	1,90	2,80	4,00	-	-	-	-	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-
	EUA	55,80	3,07	14,11	2,27	1,77	3,02	3,88	0,19	-	-	2,26	0,50	-	-	0,07	-	-	-	-	-
	África	65,48	8,07	12,08	5,91	2,85	1,23	0,55	0,12	-	0,04	-	0,88	-	-	0,07	0,09	-	-	3,52	0,07
Ouro	África	74,60	7,03	6,98	0,54	5,16	0,28	1,26	0,09	-	0,03	-	0,45	3,05	0,03	0,06	0,02	0,08	0,03	-	0,42
	Peru	89,22	0,84	6,20	-	0,29	-	1,24	-	-	-	-	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-
	Finlândia	49,90	9,20	10,40	11,80	6,80	-	1,20	-	-	-	-	1,20	-	-	-	-	-	-	13,60	-
Fosfato	Finlândia	32,98	7,98	7,08	12,92	17,28	-	5,53	0,96	-	-	-	0,27	-	-	0,12	-	-	-	14,01	0,88
Ferro	Marrocos	22,80	0,85	2,50	34,30	4,10	0,90	0,40	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,00	-
	Brasil	40,00	48,90	8,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,00	1,80
	Austrália	57,30	25,12	9,57	0,03	0,07	0,05	0,04	-	-	-	-	0,61	0,16	-	-	-	-	-	6,67	-
Vanádio	China	61,92	4,13	7,35	6,52	1,24	2,68	1,25	-	-	0,42	-	0,46	7,15	-	-	-	-	-	6,93	-
Caulinita	Finlândia	72,55	1,9	16,44	0,05	0,83	0,08	3,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,42	0,74
Chumbo-zinco	China	62,09	2,73	4,35	20,45	0,56	-	0,55	-	-	-	-	0,20	3,63	-	-	-	-	-	-	-
Hematita	EUA	68,77	28,13	0,87	0,28	0,74	0,03	0,04	-	-	-	-	0,05	-	-	-	0,001	0,02	-	-	0,07
Lítio	Finlândia	78,45	0,51	12,56	0,30	0,15	4,44	2,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,58
Bauxita	China	32,25	8,66	37,39	3,16	0,85	0,86	-	-	-	-	-	2,31	-	-	-	-	-	-	13,74	-
Quartzo	China	97,48	0,30	1,11	0,17	0,22	0,04	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tungstênio	Portugal	47,85	9,97	21,07	0,85	1,01	1,32	4,12	-	-	-	-	0,66	8,73	-	-	-	-	-	-	-
Zinco	China	38,40	11,8	12,65	29,8	-	-	1,65	0,84	-	-	-	0,59	0,52	2,96	0,62	0,21	-	0,23	-	0,12
Esfalerita	China	6,22	0,18	2,06	33,65	9,94	0,32	0,24	0,27	-	-	-	0,09	1,43	1,75	-	-	0,31	0,15	43,65	-

Fonte: Manaviparast et al. (2024)

2.5. Gestão de Resíduos

Com volumes expressivos de materiais extraídos e processados, a geração de resíduos minerais torna-se inevitável e sua gestão torna-se desafiadora. O problema, no entanto, não está em sua existência, mas na forma como são tratados, armazenados e, sobretudo, reaproveitados. Quando bem manejados, esses resíduos deixam de representar um passivo ambiental e passam a integrar soluções sustentáveis com impacto positivo ao meio ambiente e à economia. É diante dessa necessidade que surge a **mineração sustentável**, uma abordagem que alia produtividade à responsabilidade socioambiental, promovendo técnicas de gestão que minimizem os impactos e aumentam a eficiência (BVP ENGENHARIA, 2025; MINAX, [s.d.]).

Continuamente buscam-se soluções inovadoras para mitigar os desafios associados ao gerenciamento de resíduos de mineração, desenvolvendo materiais e processos que possam imobilizar ou utilizar esses componentes com segurança. As mineradoras sofrem pressão decorrente do elevado volume de resíduos gerados e pela necessidade da adoção de práticas socioambientais que promovam a redução dos riscos e danos socioambientais (CÂMARA TÉCNICA DE MEIO AMBIENTE, 2021; MANAVIPARAST et al., 2024).

Os investimentos no setor têm sido principalmente nas seguintes iniciativas: recuperação dos minérios de interesse; aproveitamento e aglomeração de finos e ultrafinos; recuperação e reaproveitamento de resíduos e elementos dispersos, incluindo processos para destinação alternativa de uso; tecnologias de baixo risco ambiental para deposição de resíduos; recuperação, reutilização, redução ou eliminação de água utilizada nos processos e monitoramento e controle de barragens (CÂMARA TÉCNICA DE MEIO AMBIENTE, 2021).

Os resíduos de mineração são materiais que não apresentam valor econômico imediato. Alguns destes materiais são reaproveitáveis e têm composição ou características que permitem sua reutilização em diferentes setores da economia. Essa diferenciação é essencial para uma gestão de resíduos eficiente e sustentável. Além disso, o reaproveitamento dos resíduos da mineração transforma passivos em ativos e favorece a construção de uma economia circular no setor, onde diversas soluções já estão em uso, com resultados promissores (MINAX, [s.d.]).

3. Mineração Sustentável

A mineração tem sido percebida com novos olhos, práticas mais modernas, responsáveis e sustentáveis. A indústria da mineração está passando por uma mudança significativa, colocando a sustentabilidade na vanguarda de suas operações, e essa tendência é particularmente evidente onde os recursos naturais tornaram-se motores essenciais do crescimento econômico. No Brasil, a mineração é responsável por parcela significativa da economia, e desta forma, é essencial manter as atividades mineradoras com um novo olhar, que mantenha o comprometimento socioambiental (BEUMER GROUP, [s.d.]; CRUZ, 2024; ZANINI RENK, [s.d.]).

Há muitos desafios a serem enfrentados para que o setor como um todo, independentemente do porte das empresas e bens minerais produzidos, se engajem nas metas estabelecidas de combate às mudanças climáticas. Devido à incorporação dos princípios de sustentabilidade serem fatores de competitividade, o Brasil deve acompanhar essa evolução e, dentro das suas esferas de competência, direcionar o amplo e diversificado setor mineral brasileiro para atuar sob esses conceitos, que é um dos pilares do Plano de Mineração 2023-2050 (SALUM, [s.d.]).

Em novembro de 2015, houve o acidente do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana - MG, de responsabilidade da Samarco Mineração S.A, considerado um dos maiores acidentes ambientais do mundo. Após 5 anos, em 2019, ocorreu o rompimento da Barragem B1, da Mina Córrego do Feijão, operada pela Vale, em Brumadinho – MG, acumulando não apenas impactos ambientais e materiais, mas a perda de 268 vidas humanas. Ambos os acidentes, em Mariana e Brumadinho, explicitam de forma dramática a necessidade de um olhar global do empreendimento, desde o projeto conceitual (SALUM, [s.d.]).

O aproveitamento de rejeitos da mineração tornou-se alvo de inúmeras ações do Ministério Público após o acidente de 2015. Tentativas de estabelecimento de prazos (10 anos) para a absorção dos rejeitos em outras cadeias produtivas foram frustradas após o entendimento da complexidade de concretizar a iniciativa devido à quantidade gigantesca de rejeito gerado, como no caso de minério de ferro. No entanto, tais iniciativas têm sido importantes para motivar empresas e instituições de pesquisa a investigarem alternativas para os rejeitos. As pilhas existentes, voltadas à disposição de estéril e de rejeitos grossos, também tem um grande volume de material, ocupando áreas extensas (SALUM, [s.d.]).

Houve a instituição de uma forte política no Brasil e movimentos da sociedade contra a disposição de rejeitos em barragens. Em 2017, a política de aproveitamento de rejeitos foi incentivada pelo governo federal ao determinar, na Lei Nº 13.540/2017, o pagamento de 50 % da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais) para o empreendedor que utilizasse os rejeitos da mineração em cadeias produtivas diferentes daquela que os gerou. Essa política foi complementada em 2021, com publicação pela ANM da Resolução Nº 85/2021 que disciplinou esse aproveitamento. Embora tais iniciativas sejam positivas, ainda são necessários estudos para encontrar formas adicionais de utilização dos rejeitos e estéreis em grandes volumes (SALUM, [s.d.]).

3.1. Transição Energética

Há uma necessidade urgente de maior sustentabilidade na extração e no uso de minerais críticos e estratégicos para a transição energética. A ascensão da energia renovável provocará um aumento na demanda por minerais específicos e as abordagens de economia circular podem diminuir o impacto socioambiental relacionada à esta demanda. A transição energética apresenta uma oportunidade para o desenvolvimento e o crescimento econômico, mas deve ser buscada com responsabilidade. A circularidade e a sustentabilidade devem estar na base de cada etapa dessa jornada (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024a).

À medida que o mundo migra de combustíveis fósseis para tecnologias de energia renovável, a demanda por minerais aumentará para atender às necessidades de equipamentos, painéis solares e baterias de veículos elétricos. De acordo com a Agência Internacional de Energia, atingir emissões líquidas zero até 2050 pode exigir um aumento de seis vezes na demanda por determinados minerais. A publicação do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) identifica 26 minerais que serão essenciais para a transição energética. Ao contrário dos combustíveis fósseis, que são queimados e perdidos, muitos desses minerais podem ser reciclados, oferecendo uma oportunidade de reduzir novas extrações por meio de maior eficiência e circularidade (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024a).

Uma maior eficiência e a implementação da circularidade poderiam reduzir a necessidade cumulativa de novos minerais (ou minerais primários) para a transição energética. Isso reduziria custos, minimizaria os riscos de fornecimento e minimizaria danos ambientais. A mineração responsável é vital para garantir que os impactos sociais e ambientais da mineração não prejudiquem as comunidades vizinhas, afirma o estudo de caso (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024a).

3.2. Mineração Circular

A crescente tendência mundial de reciclagem de materiais e aproveitamento de resíduos industriais e urbanos tem sido feita com uso das tecnologias atuais de tratamentos de minérios, ou variantes dessas. As empresas de mineração estão reconhecendo que práticas sustentáveis podem elevar a eficiências operacionais, redução de custos e melhoria da viabilidade no longo prazo. Uma vez que as regulamentações se tornam mais rigorosas e a pressão por práticas ambientalmente responsáveis se intensifica, as empresas de mineração devem inovar continuamente (CRUZ, 2024; LUZ; LINS, 2010).

A otimização na mineração, focada em sustentabilidade tem por objetivo equilibrar a produtividade com a redução de impactos ambientais. As tendências para os próximos anos apontam para a Economia Circular, com reuso ou reciclagem de materiais anteriormente descartados. A pressão regulatória de governos que implementam regulamentações ambientais e sociais mais rígidas está forçando as empresas de mineração a adaptar suas práticas (CRUZ, 2024).

A economia circular, com aproveitamento dos rejeitos em outras cadeias produtivas, tem sido objeto de ações na mineração brasileira e em todo o mundo, com o objetivo de reduzir ou mesmo extinguir a ocupação dos territórios com esses materiais, ao mesmo tempo em que se possibilita a diversificação da economia (SALUM, [s.d.]). Mas isso, não é suficiente. Os recursos naturais são finitos, e é preocupante constatar que os minerais de interesse nas reservas estão cada vez mais baixos. Uma abordagem que tem sido difundida neste setor é o reconhecimento dos rejeitos da mineração como minérios de baixo teor. No entanto, para beneficiar o mineral útil contido no rejeito, as tecnologias atuais deverão ser modificadas para que seja possível trabalhar com partículas finas e ultrafinas, ou seja, é necessário o uso da nanotecnologia (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2022).

A combinação entre inovação e circularidade representa uma oportunidade dupla para diminuir passivos antigos da mineração, gerar novos negócios a partir deles e, principalmente, reduzir a necessidade de extração de minerais virgens. Muitos rejeitos guardam pequenas quantidades de minerais que, no passado, não compensavam ser recuperados, mas, com a tecnologia atual, isso já está mudando. Outro ponto fundamental é a redução do volume das barragens. O aproveitamento dos rejeitos como um minério de baixo teor reduziria a quantidade de rejeito alocado nas barragens, amenizando as dificuldades de manutenção e estabilidade, sendo também, oportunidades para o desenvolvimento da competitividade industrial (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2022).

Tais práticas se tornam relevantes com o advento da nanotecnologia e dos minerais. Embora os minerais de interesse estejam presentes em baixos teores nos rejeitos, eles já se encontram em uma granulometria fina, o que facilita a sua extração. Ainda, já é bem estabelecido que, quando o mineral está em escala nanométrica, suas propriedades são potencializadas, e portanto, pequenas quantidades, na faixa de ppms (partes por milhão) já são suficientes para proporcionar o efeito desejado.

O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) reforça essa visão em seu guia sobre mineração circular, uma vez que, com o aumento da população e as mudanças globais em energia, a demanda por minerais vai crescer. Por isso, usar os recursos de forma eficiente é essencial, e a mineração circular busca equilibrar inovação, sustentabilidade e eficiência (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2025). O caminho para uma mineração sustentável ainda é longo, mas a adoção do conceito da economia circular deverá trazer um enorme avanço neste contexto.

A mudança do atual modelo linear de mineração para o modelo circular não só traria benefícios no cenário econômico, como também reduziria significativamente o impacto negativo no meio ambiente. Tais iniciativas incluem redução de demandas por minerais primários, extensão de vida útil de produtos e materiais, reciclagem de todos os materiais básicos, ampliação das melhores técnicas disponíveis para recuperação de minerais a partir de tecnologias de baixo carbono e capitalizar a mineração urbana (EY BRASIL, 2025a; FÓRUM PERMANENTE DA MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL, 2024; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2022; WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2022).

Tradicionalmente, a mineração é associada à extração de recursos minerais de forma linear, onde os materiais são lavrados, processados, utilizados e, a parcela que não é passível de aproveitamento, descartada. A mineração circular, por outro lado, é uma prática de maximização do uso dos recursos minerais, buscando prevenir a geração de resíduos e utilizar os que são gerados no processo produtivo, como estéril e rejeito. Devido à demanda cada vez maior por minerais, a economia circular, aliada às novas tecnologias, como a nanotecnologia, torna-se não só uma alternativa, mas uma necessidade para o setor, a fim de atrasar o esgotamento de depósitos minerais (FÓRUM PERMANENTE DA MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL, 2024; VALE, [s.d.]).

Neste contexto, a circularidade na mineração emerge como um pilar fundamental para enfrentamento dos desafios de gestão de resíduos do processo produtivo, transformando-os em oportunidade significativas de criação e compartilhamento de valor. A mineração do futuro inclui operações mais inteligentes, minas minimamente invasivas, redução significativa de estéril e rejeito, compartilhamento de valor na cadeia e nos territórios onde a mineradora atua (FÓRUM PERMANENTE DA MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL, 2024; VALE, [s.d.]).

Como exemplo, pode-se citar o projeto Waste to Value, realizado na Vale, o qual mostra que, somente no ano de 2024, foram produzidas 12,7 milhões de toneladas de minério de ferro por meio de fontes circulares, ou seja, através da “re-mineração” dos resíduos. Até 2030, a empresa pretende que 10% da sua produção anual seja proveniente da mineração circular. Este é um modelo de mineração circular na medida em que, por meio de uma série de práticas no processo produtivo, recupera-se o material das pilhas de estéril e das barragens de rejeito para produzir minério ou obter produtos secundários (EY BRASIL, 2025a).

4. Minerais Críticos e Estratégicos

Minerais críticos e estratégicos são aqueles que contribuem para o desenvolvimento econômico e são classificados a partir das políticas de cada país, dependendo das suas necessidades econômicas e comerciais. Minerais Críticos são definidos pelo alto risco de fornecimento e importância para tecnologias modernas. Minerais Estratégicos são vitais para a soberania econômica e segurança nacional de um país, muitas vezes baseados em vantagens comparativas de reservas e produção (JAZIDA, 2024).

Tabela 4 - Principais diferenças entre minerais críticos e estratégicos.

Categoria	Minerais Críticos	Minerais Estratégicos
Foco	Vulnerabilidade da cadeia de suprimentos e alta demanda global	Soberania, defesa e balança comercial
Características	Alta concentração da produção em poucos países, essencialidade para transição energética e tecnológica, alto impacto econômico em caso de interrupção	Definidos por políticas nacionais, essenciais para a economia do país (seja por importação crítica ou exportação vantajosa), essenciais para defesa
Exemplos (Brasil)	Lítio, Níquel, Cobre, Terras Raras	Nióbio, Urânio, Ouro, Potássio

Um pequeno número de países e empresas controlam a extração e refino dos minerais críticos e estratégicos. A China extrai e produz a maior parte das terras raras. A Indonésia extrai a maior quantidade de níquel. A República Democrática do Congo produz a maior parte do cobalto. Muitos desses minerais também são encontrados em um grupo considerados os menos desenvolvidos do mundo (JAZIDA, 2024; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024b).

A dependência desses minerais, portanto, implica em desafios de segurança do fornecimento e de impacto ambiental, destacando a importância de políticas e práticas de mineração responsáveis, bem como esforços de reciclagem e redução de dependência através de inovações tecnológicas. Adicionalmente, preocupações com o impacto ambiental da exploração de minerais críticos e estratégicos, são essenciais para garantir que a transição energética não substitua um conjunto de problemas ambientais por outro (JAZIDA, 2024; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024b).

A Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, IEA) projeta que a demanda por minerais críticos para tecnologias de energia limpa deve quadruplicar até 2040 para que o mundo atinja as metas do Acordo de Paris. Já está em curso uma corrida por esses minerais, com previsão de aumento da demanda por eles em todo o mundo. A nova corrida e disputa mundial não é por petróleo, mas sim, por minerais. As mineradoras estão se preparando para o aumento da demanda em um movimento que só se fortalece por trazer a sustentabilidade para o centro da produção (EY BRASIL, 2025b).

4.1. Minerais Críticos e Estratégicos no Brasil

O Brasil se destaca no cenário global como um país com um imenso potencial em recursos minerais, especialmente aqueles considerados críticos e estratégicos para a transição energética. A exploração desses recursos pode desempenhar um papel importante não apenas na diversificação da matriz energética brasileira, mas também na inserção do país como líder no mercado global de minerais críticos e estratégicos (JAZIDA, 2024).

Para o Brasil, Minerais Críticos são cruciais para a economia verde e digitalização, cuja cadeia produtiva e de processamento é vulnerável ou dominada por poucos países estrangeiros, enquanto os Minerais Estratégicos são fundamentais para a soberania e o desenvolvimento interno. O Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos - CTAPME, no uso das atribuições que lhe foram conferidas pelo art. 3º, § 1º, alínea “a” do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021, e tendo em vista o que consta do Processo SEI/MME nº 48390.000088/2021-82, resolve (BRASIL, 2021):

I - Bens minerais dos quais o País depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia (agrominerais):

- 1. Enxofre;
- 2. Minério de Fosfato;
- 3. Minério de Potássio; e
- 4. Minério de Molibdênio.

II - Bens minerais que têm importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia (minerais tecnológicos):

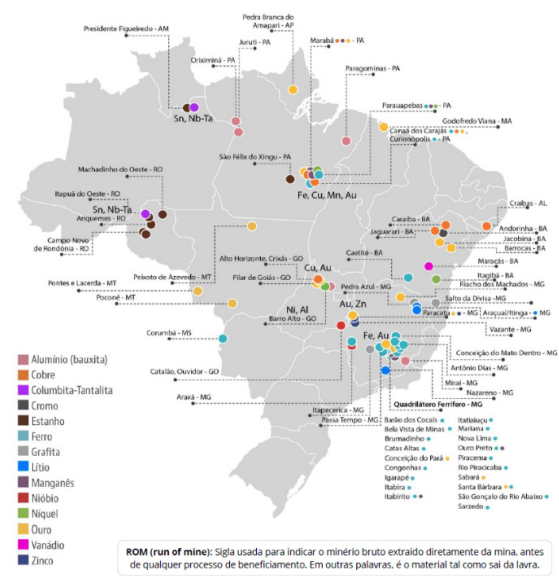
1. Minério de Cobalto;
2. Minério de Cobre;
3. Minério de Estanho;
4. Minério de Grafita;
5. Minérios de Platina;
6. Minério de Lítio;
7. Minério de Nióbio;
8. Minério de Níquel;
9. Minério de Silício;
10. Minério de Tálcio;
11. Minério de Tântalo;
12. Minério de Terras Raras;
13. Minério de Titânio;
14. Minério de Tungstênio;

III - Bens minerais que detêm vantagens comparativas e que são essenciais para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País (minerais comerciais):

1. Minério de Alumínio;
2. Minério de Cobre;
3. Minério de Ferro;
4. Minério de Grafita;
5. Minério de Ouro;
6. Minério de Manganês;
7. Minério de Nióbio; e
8. Minério de Urânio.

A **Figura 11** mostra o mapa do Brasil e onde se encontram as reservas de alguns dos minerais críticos e estratégicos. A **Figura 12** mostra algumas informações obtidas a partir da Agência Nacional de Mineração (ano base 2024), sobre as principais substâncias metálicas no Brasil, sua participação econômica e valores em termos de exportação e importação. Interessante observar que, embora os minerais estejam amplamente distribuídos pelo território brasileiro, a maior parte

Figura 11 - Mapa e localização dos principais minerais críticos e estratégicos no Brasil



Fonte: Manaviparast et al. (2024)

Figura 12 - Principais substâncias metálicas no Brasil, de acordo com ano base 2024



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2025)

A **Tabela 5** traz informações relacionadas à produção bruta, beneficiada e comercializada dos principais minerais críticos e estratégicos no Brasil, referentes ao ano de 2024. Notam-se quantidades expressivas de minerais extraídos e beneficiados, sendo a maior participação (em termos de toneladas) de ferro, ouro e alumínio, retratando a história do Brasil na mineração.

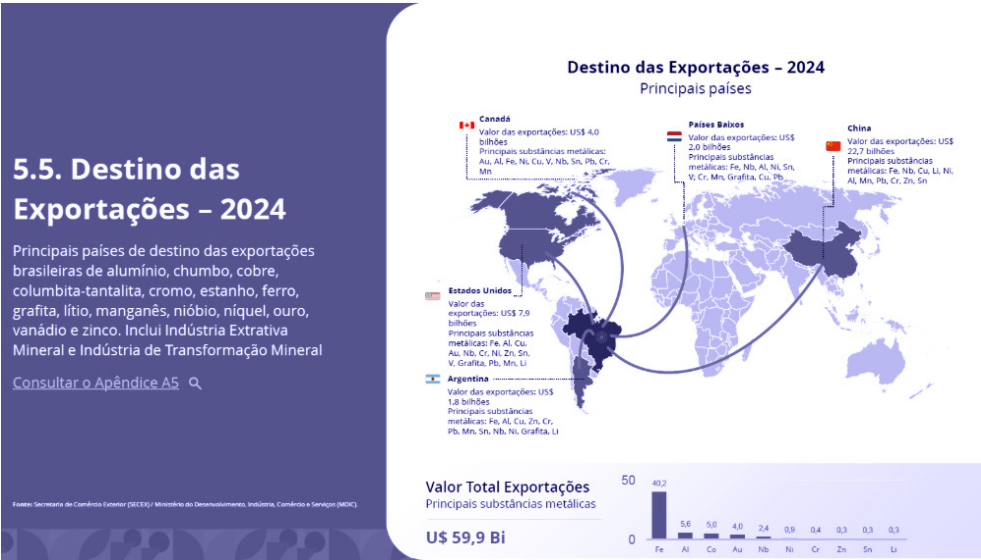
Tabela 5 - Produção bruta, beneficiada e comercializada no Brasil em 2024 para os principais minerais críticos e estratégicos.

Substância (2024)	Produção Bruta (t)		Produção Beneficiada (t)		Produção Comercializada (t)	
	Total ROM	Contido	Total	Contido	Bruta	Beneficiada
Alumínio (Bauxita)	46.420.257	1.548.729	31.848.662	5.356.037	847.919	19.438.656
Chumbo	6.013.664	98.701	55.336	16.530	-	56.968
Cobre	2.327.977	454.465	1.351.354	379.008	386.701	1.330.864
Columbita-Tantalita	-	-	12.337	4.155	-	12.676
Cromo	2.539.252	346.121	529.947	209.083	-	538.942
Estanho	-	-	23.872	12.814	-	23.667
Ferro	523.008.465	282.506.831	448.624.077	278.470.948	19.431.620	441.423.721
Grafita	1.116.641	67.671	52.215	515.288	-	52.215
Lítio	2.490.152	29.882	944.114	25.979	-	352.931
Manganês	2.174.657	712.248	1.620.217	565.738	174.073	1.313.385
Nióbio	15.829.868	215.122	213.668	109.748	-	213.668
Níquel	10.519.249	74.847	311.797	67.482	-	313.610
Ouro	89.210.429	120.868	57.770	53.983	-	57.398
Vanádio	2.249.760	18.114	389.520	11.279	-	386.714
Zinco	6.022.794	625.309	483.456	185.462	-	487.083

ROM: “run-fo-mine”, bruto; Contido: quantidade absoluta da substância de interesse presente em um depósito mineral, desconsiderando as impurezas; Beneficiado: material que já passou por processos físicos ou químicos de moagem ou purificação. Fonte: Agência Nacional de Mineração (2025)

A **Figura 13** mostra o destino das exportações dos principais minerais críticos e estratégicos no Brasil. As exportações ocorrem principalmente para Estados Unidos, Canadá, Argentina, Países Baixos e China, sendo o ferro o mineral mais exportado, ocupando cerca de 40% do volume total, seguido por alumínio, cobalto e ouro.

Figura 13 - Destino das exportações dos principais minerais críticos e estratégicos no Brasil



Por outro lado, o Brasil domina o mercado global de nióbio, com domínio total da cadeia de extração e produção. Segundo dados obtidos do Governo Federal (BRASIL, 2026), o Brasil é responsável por cerca de 93% da produção mundial de nióbio, e detentor de cerca de 67% das reservas mundiais, concentradas principalmente no estado de Minas Gerais, com depósitos expressivos também localizados em Goiás e Amazonas. Este elemento é utilizado principalmente na produção de aços especiais, que são essenciais para a construção de gasodutos, turbinas eólicas e componentes aeroespaciais (JAZIDA, 2024).

Com relação ao nióbio, o Brasil já é protagonista, dominando toda a cadeia, desde a extração até a produção, estando em 1º lugar no ranking de reservas e de produção. Dessa forma, vale destacar que o nióbio é um material estratégico apenas para o Brasil, enquanto para os demais países do mundo, é crítico. Esse exemplo de sucesso deve ser aplicado a outros minerais potenciais no Brasil, com reservas expressivas, mas produção e refino deficientes.

Figura 14 - Reservas de minerais críticos e estratégicos no Brasil e no mundo

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2025)

A **Figura 14** e a **Figura 15** listam alguns dos minerais críticos e estratégicos em termos de reservas e produção mundial, respectivamente, e mostram a participação percentual do Brasil e em que posição do ranking o Brasil se encontra. Com a 2ª maior reserva de terras raras do mundo, localizadas principalmente em áreas como Minas Gerais, Goiás e Rio Grande do Sul, o Brasil possui uma grande capacidade ainda não totalmente explorada. As terras raras são essenciais para a produção de ímãs permanentes usados em turbinas eólicas e motores de veículos elétricos, além de serem críticas para dispositivos eletrônicos, equipamentos de defesa e tecnologias de baixo carbono (JAZIDA, 2024).

O grande problema é que, embora o Brasil possua reservas expressivas de terras raras, o país ainda não domina completamente a extração, e muito menos, o beneficiamento e refino, que são as etapas de maior valor agregado. O Brasil está em 9º lugar no ranking de produção de terras raras. Portanto, aqui, reside uma grande oportunidade para o Brasil se tornar protagonista no cenário mundial frente ao fornecimento de terras raras.

MINERAL	RESERVA 2025 (Toneladas)	MUNDO (Toneladas)	% PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA	RANKING BRASILEIRO
Alumínio (bauxita)	1.700.000.000	29.000.000.000	5,9%	6º
Grafite	74.000.000	310.000.000	23,9%	2º
Lítio	1.840.000	37.000.000	5,0%	6º
Manganês	300.000.000	1.800.000.000	16,7%	3º
Nióbio	14.000.000	21.000.000	66,7%	1º
Níquel	16.000.000	140.000.000	11,4%	3º
Silício	—	—	—	—
Terras raras	21.000.000	85.000.000	24,7%	2º
Vanádio	94.000	21.000.000	0,4%	5º
Cobre	79.000.000	980.000.000	8,1%	6º
Cobalto	<1.000	12.000.000	—	—
Urânio	167.800	5.925.700	2,8%	9º

Fontes e referências: Lítio (USGS e Sigma Lithium, publicadas pela Bolsa de Toronto), cobre e cobalto (2024) e urânio (2023).

Figura 15 - Produção de minerais críticos e estratégicos no Brasil e no mundo

PRODUÇÃO DE MINERAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS NO BRASIL E NO MUNDO	MINERAL	PRODUÇÃO 2025 (Toneladas)	MUNDO (Toneladas)	% PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA	RANKING BRASILEIRO
	Alumínio (bauxita)	33.000.000	440.000.000	7,5%	4º
	Grafite	65.000	1.800.000	3,6%	4º
	Lítio	12.000	290.000	4,1%	6º
	Manganês	800.000	20.000.000	4,0%	5º
	Nióbio	104.000	112.000	92,9%	1º
	Níquel	70.000	3.900.000	1,8%	7º
	Silício	350.000	9.600.000	3,6%	3º
	Terras raras	2.000	390.000	0,5%	9º
	Vanádio	5.300	110.000	4,8%	3º
	Cobre	384.000	23.000.000	1,7%	—
	Cobalto	0	310.000	0,0%	—
	Urânio	43	59.000	0,07%	14º

Referências: cobre e cobalto (2024) e urânio (2022)

4.2. Potencial para o Brasil na Transição Energética

Diversas tecnologias têm sido adotadas e desenvolvidas para atingir esse objetivo: energias renováveis, eletrificação, eficiência energética, armazenamento de energia, hidrogênio verde, substituição de combustíveis fósseis, biocombustíveis, tecnologias de captura e uso de carbono. Com isso, a demanda por minerais críticos e estratégicos, essenciais para esta transformação, aumenta exponencialmente. No entanto, a exploração e produção dos **recursos minerais** deve ser realizada de forma responsável e sustentável, para que as soluções para a crise climática não gerem novos problemas ambientais (JAZIDA, 2024).

Uma transição energética sustentável exige um compromisso global com o gerenciamento responsável dos minerais, promovendo alternativas circulares. Essa nova dinâmica global cria uma série de oportunidades para o setor de mineração. Em relação à produção e ao processamento dos minerais críticos, a China se destaca no mundo, mas o Brasil pode se beneficiar de uma certa “neutralidade” geopolítica e matriz energética limpa. Para a Europa e os EUA, pode fazer mais sentido, em termos de segurança de suprimento ou fornecimento, comprar do Brasil do que da China, motivo pelo qual precisamos nos aproveitar dessa vantagem competitiva (EY BRASIL, 2025b; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024a).

4.2. Potencial para o Brasil na Transição Energética

Diversas tecnologias têm sido adotadas e desenvolvidas para atingir esse objetivo: energias renováveis, eletrificação, eficiência energética, armazenamento de energia, hidrogênio verde, substituição de combustíveis fósseis, biocombustíveis, tecnologias de captura e uso de carbono. Com isso, a demanda por minerais críticos e estratégicos, essenciais para esta transformação, aumenta exponencialmente. No entanto, a exploração e produção dos **recursos minerais** deve ser realizada de forma responsável e sustentável, para que as soluções para a crise climática não gerem novos problemas ambientais (JAZIDA, 2024).

Uma transição energética sustentável exige um compromisso global com o gerenciamento responsável dos minerais, promovendo alternativas circulares. Essa nova dinâmica global cria uma série de oportunidades para o setor de mineração. Em relação à produção e ao processamento dos minerais críticos, a China se destaca no mundo, mas o Brasil pode se beneficiar de uma certa “neutralidade” geopolítica e matriz energética limpa. Para a Europa e os EUA, pode fazer mais sentido, em termos de segurança de suprimento ou fornecimento, comprar do Brasil do que da China, motivo pelo qual precisamos nos aproveitar dessa vantagem competitiva (EY BRASIL, 2025b; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024a).

A IEA define os seguintes minerais como essenciais à transição energética: lítio, grafite, níquel, cobre, cobalto e elementos de terras raras, os quais são apresentados juntamente com outros minerais na Figura 16. A expansão da frota de veículos híbridos ou elétricos e a ampliação da geração de energia elétrica a partir da fonte solar e eólica dependem de uma rápida e exponencial expansão na produção de baterias (BRASIL, 2025).

Figura 16 - Exemplos de alguns minerais classificados como estratégicos no Brasil e suas aplicações.

Críticos e futuristas		
Minerais classificados como estratégicos pelo Brasil para processos de alta tecnologia		
	Minério de Cobalto	Usado em baterias recarregáveis, em motores a jato (como superligas)
	Minério de cobre	Usado em fios, cabos e ligas com aplicações variadas, entre elas painéis solares, usinas eólicas e baterias
	Minério de estanho	Usado em revestimentos protetores e ligas para o aço
	Minério de grafita	Usado para lubrificantes, baterias recarregáveis e em células combustíveis
	Minérios do grupo da platina	Usados em catalisadores
	Minério de lítio	Usado em baterias recarregáveis e em ligas de alumínio-lítio para indústria aeroespacial
	Minério de nióbio	Usado principalmente na fabricação de aço e de superligas, em diversos setores, de defesa à infraestrutura
	Minério de níquel	Usado na fabricação de aço inoxidável, superligas e baterias recarregáveis
	Minério de silício	Usado pela indústria eletrônica, de vidros e em painéis solares
	Minério de tálio	Usado na medicina nuclear
	Minério de tântalo	Usado em componentes eletrônicos principalmente em capacitores e em superliga
	Minério de terras raras	Usadas em setores diversos, entre eles em equipamentos para orientação espacial, laser e fibra óptica
	Minério de titânio	Usado como pigmento branco ou em ligas metálicas
	Minério de tungstênio	Usado principalmente em metais resistentes ao desgaste, como em ferramentas de corte, e também em catalisadores e motores a jato
	Minério de urânio	Usado em aplicações nucleares e em aplicações médicas
	Minério de vanádio	Usado em processos siderúrgicos para tornar o aço mais forte e leve

Fonte: Ministério das Minas e Energia, Ipea, Abcobre e U.S. Geological Survey.

Conforme estudos da IEA, no cenário de emissões líquidas zero até 2050, a demanda global por lítio deve ser nove vezes superior, enquanto a demanda por grafita deve triplicar. A energia fotovoltaica e a energia eólica exigem quantidades significativas de cobre e ferro, respectivamente, e a fabricação de turbinas eólicas requer grandes quantidades de terras raras. A demanda por cobre nos próximos 25 anos é projetada para superar toda a produção dos últimos 5 mil anos, enquanto a demanda por lítio deve crescer até 2050, estimada em 965% (BRASIL, 2025).

Com o avanço dos esforços para a transição energética, uma das principais oportunidades que se abrem consiste na exploração responsável dos minerais críticos e estratégicos para a transição energética. O setor mineral tem grande importância para o Brasil, o qual dispõe de algumas reservas conhecidas muito expressivas, ocupando as seguintes posições no ranking mundial: nióbio (1º), grafita (2º), terras raras (2º), níquel (3º), manganês (4º), vanádio (5º), bauxita (6º), lítio (6º) e cobre (6º) (BRASIL, 2026).

Já existem estratégias encaminhadas para exploração desses recursos que partiram de dois documentos do Poder Executivo: o **Plano Nacional de Mineração (PNM) 2030** e a **Estratégia Nacional de Ciência e Tecnologia 2016-2022**. O **Ministério de Minas e Energia (MME)** está viabilizando a implantação de uma **Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE)**. A política tem como objetivos ampliar o conhecimento geológico e a pesquisa mineral, fortalecer a produção e o beneficiamento nacional, integrar as cadeias produtivas de base, reduzir a vulnerabilidade externa frente à importação de minerais essenciais e assegurar a soberania e a autonomia competitiva do Brasil no contexto da transição energética e tecnológica (BRASIL, 2025).

O Brasil tem pelo menos 50 projetos de minerais para a transição energética em andamento, distribuídos entre fases pré-operacionais e fase de lavra, com investimentos previstos superiores a US\$ 18 bilhões. Há boa oferta de mão-de-obra qualificada de nível superior, além de centros de excelência em pesquisa e desenvolvimento na área de mineração e transformação mineral (BRASIL, 2025).

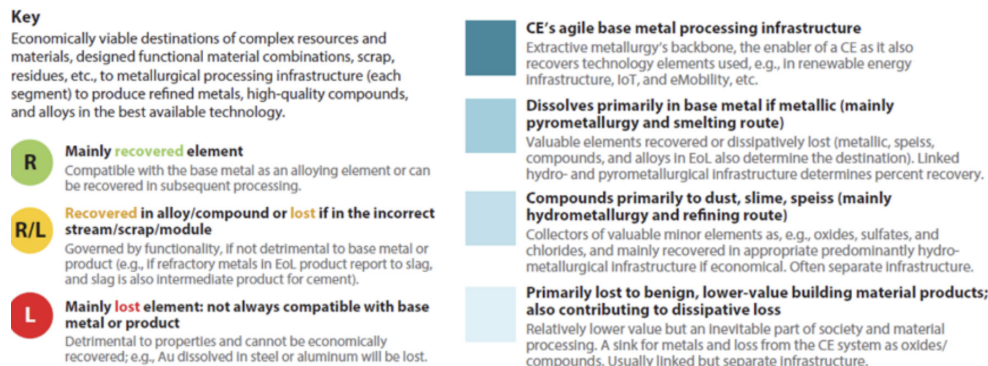
O Fundo de Investimento em Participações (FIP) tem o potencial de alavancar o setor mineral com ações que contribuem para o aproveitamento do vasto potencial do país, permitindo se posicionar como fornecedor de minerais críticos e estratégicos para atender à demanda mundial. Outro objetivo é estimular as empresas a adotarem práticas ESG na mineração. O FIP busca estimular um novo ciclo de fomento à produção de minerais estratégicos, com foco em inovação e sustentabilidade – pilares da Nova Indústria Brasil e do Plano Mais Produção, do Governo Federal (BRASIL, 2025).

No documento da IEA, o Brasil não aparece como grande produtor de minerais críticos e estratégicos, apenas de grafite, embora o Brasil já se destaque pela produção de nióbio (POLÍTICA POR INTEIRO, 2024). No entanto, o documento de 2023 da Agência Internacional de Energia Renovável (International Renewable Energy Agency, IRENA) sobre a geopolítica da transição energética mostra o Brasil como potencial para mineração de lítio, níquel, manganês, neodímio e grafite, dando uma perspectiva positiva para o país (POLÍTICA POR INTEIRO, 2024). No entanto, a exploração de minerais críticos e estratégicos para a transição energética no Brasil enfrenta alguns desafios, incluindo impactos ambientais, quadro regulatório complexo e burocrático, infraestrutura logística e energética deficiente, necessidade de tecnologia avançada e mão de obra qualificada, além da competitividade do mercado global (JAZIDA, 2024).

Se o mundo quiser adotar integralmente as energias renováveis e atingir emissões líquidas zero de gases de efeito estufa, o uso de minerais aumentará significativamente, elevando o valor de mercado para mais de US\$ 400 bilhões. Tal cenário poderia impulsionar o crescimento econômico nos países em desenvolvimento, como o Brasil. Com as políticas e salvaguardas adequadas, a extração dessas substâncias poderia dar início a uma nova era de desenvolvimento sustentável. A mineração do futuro irá necessitar de **estratégias de longo prazo** em toda a cadeia de valor, e, ao mesmo tempo, limitar os impactos socioambientais associados à sua produção (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024b).

Uma estratégia importante para a mineração do futuro é reduzir a extração de minerais virgens. A tecnologia renovável deve se tornar mais eficiente para possibilitar que as indústrias que utilizam minerais façam “mais com menos”. Isso pode ser viabilizado por meio da utilização dos minerais em escala nanométrica, uma vez que, nesta escala, devido à redução dos defeitos microestruturais e aumento da área superficial, as propriedades dos minerais são melhoradas e potencializadas. Desta maneira, utilizando nanominerais, é possível utilizar quantidades significativamente menores, obtendo os mesmos efeitos que seriam obtidos com quantidades maiores dos minerais em escala micrométrica.

Adicionalmente, existem um grande potencial de extração de minerais nos materiais considerados resíduos de mineração (estéril e rejeito). Sabe-se que cerca de 99% do material extraído da jazida é considerado como resíduo, sem qualquer interesse técnico ou econômico. No entanto, existem diversos elementos associados ao mineral de interesse, sendo apenas necessárias etapas de beneficiamento adicionais para fragmentar, extrair ou separar substâncias de interesse. Essa mineração “secundária”, além de ser uma fonte alternativa de minerais, é uma fonte alternativa de valor econômico, contribuindo também para a redução da necessidade de extração de minerais virgens.



Fonte: Reuter et al. (2019).

Rejeitos de minério de ferro (hematita) podem ser utilizados como catalisadores e suportes para a produção de nanomateriais de carbono (NMCs) através da deposição química de vapor (CVD). Rejeitos ricos em argilas, como vermiculita, mica e caulinita, podem ser processados para a obtenção de nanoargilas (montmorilonita, haloisita) usadas em materiais compósitos, tintas e polímeros. Resíduos industriais de mineração, como manganês e vermiculita, são processados para criar materiais capazes de remover poluentes, metais pesados e corantes industriais da água (MARTINS; TRINDADE, 2012).

O Brasil possui uma lista de minerais considerados estratégicos para o desenvolvimento tecnológico e a economia, muitos dos quais podem ser obtidos ou concentrados através do reprocessamento de rejeitos. A mineração sustentável utiliza tecnologias para transformar o passivo ambiental (rejeitos) em ativo econômico. O uso de rejeitos para a produção de nanomateriais não apenas reduz o volume de materiais dispostos em barragens, mas também diminui o impacto ambiental e gera novas cadeias produtivas, além de reduzir o consumo e extração de minerais virgens (MARTINS; TRINDADE, 2012).

A nova geração de nanominerais e nanoprocessos é repleta de oportunidades. Incorporar os princípios e paradigmas da 4ª revolução industrial, com ênfase nas práticas 4.0 e nas nanotecnologias, consolida-se nas propostas de planejamento estratégico das grandes minerações pelo mundo e no engajamento a desafios setoriais por inovações mais disruptivas e transformadoras (CIMINELLI, 2020).

No que se refere aos nanoprocessos na mineração, inúmeros projetos de pesquisa, em várias partes do mundo, com resultados muito promissores, antecipam um avanço acelerado na aplicação de nanotecnologia e nanomateriais. Alguns exemplos de destaque são: recuperação de metais valiosos resíduos, nanopartículas para adsorção e recuperação de ouro, uso de grafeno em fluidos de sondagem, aditivos lubrificantes, nanomateriais para dopagem, entre outros (CIMINELLI, 2020).

As tendências tecnológicas no setor automotivo fomentam a criação de uma nova cadeia de fornecimento sustentável, baseada em neomineração, com aproveitamento de resíduos e subprodutos do processo de mineração. A Figura 17 demonstra como a neomineração poderia ser incorporada dentro da cadeia convencional de mineração. É uma possibilidade para integrar tecnologias emergentes, processos inovadores e articulação com a cadeia produtiva existente, contribuindo de forma decisiva para o avanço da independência tecnológica do Brasil no setor da mobilidade e soberania na produção de insumos estratégicos para a transição energética, conectando nanotecnologia e neomineração, conforme demonstrado na **Figura 18**.

Figura 18 - Fluxograma indicando as principais etapas da mineração convencional e neomineração.



Fonte: Elaboração própria com auxílio de inteligência artificial (Microsoft Copilot), 2025.

Figura 19 - Conexão entre nanotecnologia, minerais estratégicos, neomineração e transição energética.



Fonte: Elaboração própria com auxílio de inteligência artificial (Microsoft Copilot), 2025.

Tudo isso representa uma oportunidade pioneira de estruturar uma nova cadeia de fornecimento baseada em princípios sustentáveis, com alto valor agregado e impactos positivos nas áreas ambientais, econômicas e sociais. É necessário um desenvolvimento de cadeia, dado que os rejeitos são considerados descartes e não há uma política que preveja a mineração de segunda fase como estratégica para a geração de matérias-primas de alto impacto para o setor da mobilidade. Além de se catalogar os minerais disponíveis nas barragens e suas devidas quantidades, será necessário entender como os rejeitos serão disponibilizados para purificação.

A reutilização de resíduos estéreis e rejeitos de mineração para a produção de novos minerais reduz a necessidade da extração de minerais virgens, bem como, geração de resíduos de mineração. Este tipo de mineração promove a economia circular e mitiga impactos ambientais, pois, diferentemente da mineração primária (extração direta), ela reutiliza materiais, reduzindo custos de produção e a pressão sobre recursos naturais. Enquanto a mineração primária extrai recursos da natureza, a secundária foca no reprocessamento de materiais já extraídos, alinhando-se à sustentabilidade.

As principais vantagens destas práticas de neomineração residem na sustentabilidade, redução da contaminação ambiental e fornecimento de matérias-primas críticas. Os principais desafios envolvem a necessidade de desenvolver tecnologias mais baratas e aprimorar a logística reversa para viabilizar a reciclagem em larga escala.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2025 – ano base 2024. Brasília: ANM, 2025. 55 p.

BAIG, N.; KAMMAKAKAM, I.; FALATH, W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, v. 2, n. 6, p. 1821–1871, 2021. DOI: 10.1039/d0ma00807a.

BEUMER GROUP. Sustainability made different. [S.l.]: Beumer Group, [s.d.]. Disponível em: <https://www.beumergroup.com/about-us/sustainability/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

BEZERRA, F. D. Minerais Críticos e Estratégicos no Nordeste. Caderno Setorial ETENE, Fortaleza, ano 10, n. 404, set. 2025. ISSN 2966-3482.

BNAMERICAS. Mining Survey 2023: ESG and optimization at the forefront. Santiago: BNamericas, ago. 2023. (Intelligence Series – Mining & Metals).

BORGES, V. H. A. Metodologias de disposição de rejeitos na mineração. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão, Catalão, 2018.

BRASIL. Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Brasília: MME, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-lanca-relatorio-anual-do-comite-interministerial-de-analise-de-projetos-de-minerais-estrategicos/resolucao2CTAPME.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Minerais estratégicos para transição energética. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/brasil-lider-mundial-na-transicao-energetica/transicao-energetica/minerais-estrategicos-para-transicao-energetica>. Acesso em: 15 jun. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos. Brasília: MME, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/a-revolucao-brasileira-em-energia-e-mineracao/mineracao-e-transformacao-mineral/politica-nacional-de-minerais-criticos-e-estrategicos>. Acesso em: 15 jun. 2026.

BVP ENGENHARIA. Rejeitos de mineração: caminhos para a gestão sustentável. In: Blog BVP, 5 jun. 2025. Disponível em: <https://bvp.eng.br/rejeitos-de-mineracao/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

CÂMARA TÉCNICA DE MEIO AMBIENTE (CRQ-III). Rejeitos na mineração e o desenvolvimento sustentável. In: CT CRQ3, 8 jul. 2021. Disponível em: <https://ct.crq3.org.br/2021/07/08/rejeitos-na-mineracao-e-o-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

CIMINELLI, R. A nova geração de nano-minerais e nano-processos. In: Brasil Mineral, 29 out. 2020. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/a-nova-geracao-de-nano-minerais-e-nano-processos>. Acesso em: 15 jun. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Economia circular: o uso eficiente dos recursos. Brasília: CNI, 2018a. 36 p. ISBN 978-85-7957-203-6.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2018b. 64 p. ISBN 978-85-7957-166-4.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Economia circular: caminho estratégico para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2019. 68 p.

CRUZ, M. Como a mineração sustentável está mudando as perspectivas na América Latina. In: Veolia Water Tech Blog, 1 nov. 2024. Disponível em: <https://www.watertechsolutions.com.br/blog/how-sustainable-mining-changing-outlook-latin-america>. Acesso em: 16 jun. 2026.

EY BRASIL. COP30: minerais críticos impulsionam sustentabilidade na mineração. In: EY Newsroom, 13 nov. 2025. Disponível em: https://www.ey.com/pt_br/newsroom/2025/11/cop30-minerais-criticos-impulsionam-sustentabilidade-mineracao. Acesso em: 15 jun. 2026.

EY BRASIL. Mineração circular encontra minério em material tido antes como descartável. In: EY Newsroom, 6 out. 2025. Disponível em: https://www.ey.com/pt_br/newsroom/2025/10/mineracao-circular-encontra-minerio-material-tido-antes-como-descartavel. Acesso em: 15 jun. 2026.

FERREIRA, V. B. Nanotecnologia e sua importância no contexto brasileiro. In: E-science e políticas públicas para ciência, tecnologia e inovação no Brasil [online]. Salvador: EDUFBA, 2018. p. 97–106. DOI: 10.7476/9788523218652.0007.

FÓRUM PERMANENTE DA MINERAÇÃO SUSTENTÁVEL. Economia circular na mineração. In: Mineração Sustentável, 29 abr. 2024. Disponível em: <https://mineracaosustentavel.org.br/economia-circular-na-mineracao/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

GEMDRA. Inovações na disposição de rejeitos na mineração. In: Blog Gemdra, 14 ago. 2024. Disponível em: <https://gemdra.com.br/blog/inovacoes-na-disposicao-de-rejeitos-na-mineracao/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

GOMES, A. C. F. Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GUEDES, G. B.; SCHNEIDER, C. Disposição de rejeitos de mineração: as opções tecnológicas para a redução dos riscos em barragens. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 27., 2017, Belém. Anais [...]. Belém: ENTMME, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Minerais críticos e estratégicos no Brasil: um passaporte para o futuro. Brasília: IBRAM, 2025. 268 p. ISBN 978-85-61993-22-1.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Práticas em circularidade no setor mineral. Brasília: IBRAM, 2022. ISBN 978-85-61993-14-6.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Economia circular e mineração. In: IPT, 7 jun. 2022. Disponível em: <https://ipt.br/2022/06/07/economia-circular-e-mineracao/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

JAZIDA. Explorando novos caminhos para a transição energética: o papel dos minerais críticos no Brasil. In: Blog Jazida, 25 jul. 2024. Disponível em: <https://blog.jazida.com/explorando-novos-caminhos-para-a-transicao-energetica-o-papel-dos-minerais-criticos-no-brasil/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

LEAL FILHO, L. S. Mineração de terras raras no Brasil: oportunidades e desafios. A Lanterna, [S.l.], p. 1–18, 2026.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (ed.). Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p. 3–20.

MANAVIPARAST, H. R. et al. A comprehensive review on mine tailings as a raw material in the alkali activation process. Applied Sciences, v. 14, n. 12, p. 5127, 2024. DOI: 10.3390/app14125127.

MARTINS, M. A.; TRINDADE, T. Os nanomateriais e a descoberta de novos mundos na bancada do químico. Química Nova, São Paulo, v. 35, n. 7, p. 1434–1446, 2012.

MEKUYE, B.; ABERA, B. Nanomaterials: an overview of synthesis, classification, characterization, and applications. Nano Select, v. 4, n. 8, p. 486–501, 2023. DOI: 10.1002/nano.202300038.

MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L. de; OGANDO, L. D. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 43, p. 325–361, mar. 2016.

MINAX CONSTRUÇÕES E MINERAÇÃO. Gestão de resíduos de mineração: como podem ser reaproveitados? In: Blog Minax, [s.d.]. Disponível em: <https://minax.com.br/site/gestao-de-residuos/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

MIRANDA, R. O. et al. Economia circular: desafios e oportunidades para empresas brasileiras. Revista REGEO, São José dos Pinhais, v. 16, n. 4, Edição Especial, p. 1–19, 2025. DOI: 10.56238/revgeov16n4-060.

OLIVEIRA, J. M. de; SILVA, V. C. e. Otimização da metodologia Mine to Mill e fotoanálise na mina subterrânea de Ipueira. Revista Foco, v. 17, n. 12, e7281, p. 1–16, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n12-128.

PEREIRA, C.; GONÇALVES, G.; ROBRA, S. Estudo para a promoção da economia circular na indústria brasileira: demandas por competências, formação profissional e oferta de cursos. Brasília: GIZ/MEC/ SENAI, 2023.

POLÍTICA POR INTEIRO. Minerais estratégicos e a transição energética: como o Brasil vai lidar com a produção? Rio de Janeiro: Instituto Talanoa, 2024. Disponível em: <https://politicaporinteiro.org/notas-tecnicas-e-outras-analises/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

POPE, N.; SMITH, P. Minerais críticos e estratégicos do Brasil em um mundo em transformação. Rio de Janeiro: Instituto Igarapé, out. 2023.

PORTAL DA MINERAÇÃO. Como a tecnologia está transformando os rejeitos da mineração em novos produtos. In: Portal da Mineração, 4 dez. 2025. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/como-a-tecnologia-esta-transformando-os-rejeitos-da-mineracao-em-novos-produtos/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Novo estudo de caso analisa como a circularidade, a equidade e a responsabilidade são vitais para a transição energética. In: UNEP, 19 nov. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/destaque-tecnico/novo-estudo-de-caso-analisa-como-circularidade-equidade-e-responsabilidade-sao>. Acesso em: 15 jun. 2026.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. O que são minerais de transição energética e como eles podem destravar a era da energia limpa? In: UNEP, 19 fev. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/o-que-sao-minerais-de-transicao-energetica-e-como-eles-podem>. Acesso em: 15 jun. 2026.

SALUM, M. J. G. Desenvolvimento sustentável na indústria mineral brasileira. Brasília: MME, [s.d.]. (Plano Nacional de Mineração 2022–2050, Caderno 5).

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Panorama do potencial do Brasil para minerais críticos e estratégicos: edição 2024. Brasília: SGB, 2024. 35 p.

SILVA, A. P. M. da; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas. Brasília: IPEA, 2012. (Relatório de Pesquisa). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/877e1323-c950-4230-a352-a2bfdaf05113>. Acesso em: 15 jun. 2026.

SILVA, E. G.; FERREIRA, K. C. Gestão de rejeitos de minério de ferro: implementação de filtro prensa como estratégia para sustentabilidade ambiental. Revista Foco, v. 18, n. 7, e9171, p. 1–26, 2025. DOI: 10.54751/revistafoco.v18n7-041.

SIQUEIRA-BATISTA, R. et al. Nanociência e nanotecnologia como temáticas para discussão de ciência, tecnologia, sociedade e ambiente. Ciência & Educação, Bauru, v. 16, n. 2, p. 479–490, 2010.

SUDÁRIO, F. E. P. Cominuição seletiva de minerais de diferentes moabilidades. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

VALE. Mineração circular. [S.l.]: Vale, [s.d.]. Disponível em: <https://vale.com/pt/esg/mineracao-circular>. Acesso em: 15 jun. 2026.

VERTOWN. Resíduos da mineração: tipos, rejeitos e como destinar? In: Blog Vertown, 27 abr. 2025. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/residuos-da-mineracao-tipos-rejeitos-e-como-destinar/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. O futuro é circular: a economia circular e os minerais críticos para a transição verde. Gland: WWF, 2022.

ZANINI RENK. Mineração sustentável: o que é? Qual o impacto para o futuro? In: Zanini Renk, [s.d.]. Disponível em: <https://zaninirenk.com.br/mineracao-sustentavel-o-que-e>. Acesso em: 15 jun. 2026.

**A Tríplice Hélice
como incentivador da
inovação em Minerais
Críticos e Materiais
Estratégicos**

Sumário

1. Introdução	306
2. Trílice Hélice	307
3. Organizações intermediárias	309
4. A experiência da Fundep na articulação entre universidade, indústria e governo por meio do Mover	311
5. Minerais críticos como agenda estratégica para a cooperação tecnológica	313
6. Considerações finais	315
7. Referências Bibliográficas	316

1. Introdução

A transformação da indústria da mobilidade não depende exclusivamente da disponibilidade de recursos minerais ou do avanço das tecnologias de processamento. A competitividade passa, cada vez mais, pela capacidade de articular conhecimento científico, capacidade industrial e políticas públicas em torno de agendas tecnológicas de longo prazo.

No contexto dos minerais críticos e materiais estratégicos, como vimos ao longo dos capítulos anteriores, essa articulação torna-se ainda mais relevante. O desenvolvimento de novas rotas de beneficiamento mineral, materiais avançados, processos de reciclagem, economia circular, neomineração, metalurgia de baixo carbono, rastreabilidade e manufatura sustentável exige elevados investimentos em pesquisa, infraestrutura tecnológica e formação de recursos humanos altamente especializados.

Nenhum desses desafios pode ser enfrentado isoladamente. Nesse cenário, o modelo da Tríplice Hélice, proposto por Henry Etzkowitz e Loet Leydesdorff (2000), consolidou-se como uma das principais referências para compreender a dinâmica dos ecossistemas contemporâneos de inovação.

A experiência brasileira no âmbito do programa Mover (Mobilidade Verde e Inovação) demonstra, na prática, o potencial transformador do modelo da Tríplice Hélice. Como coordenadora de Programas Prioritários do Mover, a Fundação de Apoio da UFMG (Fundep) vem desempenhando um papel estruturante na articulação entre governo, universidades, institutos de pesquisa e setor produtivo, criando mecanismos permanentes de cooperação voltados ao desenvolvimento tecnológico da indústria automotiva brasileira.



2. O modelo Tríplice Hélice

A inovação tecnológica não se restringe à geração de conhecimento científico, mas envolve todo o ciclo que vai da pesquisa básica e aplicada ao desenvolvimento, produção, comercialização e difusão de novos produtos, processos e serviços. Para Cassiolato e Lastres (2005), a inovação resulta da interação entre diferentes atores e das constantes retroalimentações ao longo desse processo.

Nesse contexto, Etzkowitz e Leydesdorff (2000) propõem o modelo da Tríplice Hélice (Triple Helix), que busca explicar a dinâmica da inovação por meio da interação entre universidade, empresa e governo. O modelo representa uma alternativa intermediária entre o livre mercado e o planejamento centralizado, defendendo que o desenvolvimento econômico depende da articulação contínua entre essas três esferas e da aproximação entre pesquisa básica e aplicada.

Segundo Amaral (2022), a Tríplice Hélice constitui uma metáfora para compreender a interação não linear entre instituições responsáveis pela geração do conhecimento (universidades), pela aplicação econômica desse conhecimento (empresas) e pela regulação e fomento da atividade econômica (governo). A inovação passa a ser entendida como resultado da colaboração estruturada entre esses atores, que compartilham responsabilidades e desenvolvem competências complementares.

A universidade deixa de exercer exclusivamente as funções tradicionais de ensino e pesquisa, assumindo também um papel ativo na transferência de conhecimento, no empreendedorismo e na promoção do desenvolvimento regional. As empresas tornam-se responsáveis pela transformação do conhecimento em produtos, serviços e processos inovadores, enquanto o governo cria condições institucionais favoráveis por meio de políticas públicas, instrumentos regulatórios e mecanismos de financiamento.

Fe (2009) destaca que o modelo complementa a economia evolucionária da inovação ao incorporar elementos da sociologia, especialmente os processos de comunicação e reflexividade entre os atores sociais. Além de seu caráter analítico, a Tríplice Hélice apresenta uma dimensão normativa, orientando políticas voltadas ao fortalecimento da economia baseada no conhecimento.

No Brasil, conforme Amaral (2022), a difusão da Tríplice Hélice ocorreu paralelamente à disseminação dos Arranjos Produtivos Locais (APL). Embora frequentemente associados, os dois conceitos possuem finalidades distintas: enquanto os APL concentram-se no fortalecimento de cadeias produtivas, a Tríplice Hélice enfatiza a produção conjunta de conhecimento e inovação por meio da cooperação institucional.

Uma das principais contribuições do modelo é reconhecer a universidade como protagonista do sistema de inovação, superando sua função tradicional de apoio científico. Essa perspectiva está associada aos conceitos de universidade empreendedora e da chamada “terceira missão”, voltada à geração de impacto econômico e social.

Dagnino (2003) ressalta que a Tríplice Hélice fortalece a cooperação entre instituições públicas e privadas para o desenvolvimento tecnológico, enquanto Plonski (1995) argumenta que essas parcerias geram benefícios para todos os envolvidos: as universidades ampliam suas fontes de financiamento e a aplicação de suas pesquisas; as empresas acessam conhecimento e talentos; e o governo fortalece sua capacidade de promover o desenvolvimento econômico e social.

Por sua vez, Baêta, Borges e Tremblay (2005) destacam que a expansão das incubadoras tecnológicas, especialmente em universidades, contribuiu para consolidar esse modelo de cooperação, aproximando academia e setor produtivo e estimulando o empreendedorismo e a inovação.

Em síntese, o modelo da Tríplice Hélice demonstra que a inovação resulta da interação contínua entre universidade, empresa e governo. Ao promover a cooperação, o compartilhamento de conhecimento e a criação de ambientes institucionais favoráveis, esse modelo tornou-se uma das principais referências para compreender e orientar políticas e estratégias voltadas ao desenvolvimento tecnológico e à inovação.

3. O papel das organizações intermediárias

Os trabalhos mais recentes sobre a Tríplice Hélice têm focado no estudo das organizações intermediárias, entendidas como organizações híbridas, formadas endogenamente pela sobreposição institucional entre as três esferas do modelo, influenciando fortemente a relação Universidade-Empresa-Governo (JOHNSON, 2008; METCALFE, 2010; FARIA; RIBEIRO, 2016). Os parques tecnológicos são típicos exemplos dessas organizações intermediárias (ETZKOWITZ; ZHOU, 2018; DABROWSKA; FARIA, 2020), assim como as incubadoras de empresas e os Núcleos de Inovação Tecnológica (NIT).

É nesse contexto que a Triple Helix opera para a criação de ecossistemas de empreendedorismo e inovação. O papel das organizações intermediárias na Tríplice Hélice pode ser analisado considerando quatro dimensões (FARIA et al., 2019):

- 1) Dimensão técnica e científica, que contempla a esfera da universidade e das instituições de pesquisa geradoras de conhecimento;
- 2) Dimensão de negócios, que representa a esfera das indústrias e empresas;
- 3) Dimensão de desenvolvimento sustentável, que contempla a esfera do governo e da sociedade;
- 4) Dimensão de aprendizado, que representa as condições relacionadas à cultura da inovação, do empreendedorismo e das redes de relacionamento.

Conforme os autores, para que essas dimensões não sejam estáticas, se relacionem e se desenvolvam. Na visão da 3H, a organização intermediária terá que desenvolver um ambiente propício, como um portfólio de serviços, atividades, práticas, ações e facilidades que coloquem as “hélices em movimento”, não apenas promovendo a relação entre as esferas da hélice, mas, desenvolvendo condições para que os atores possam desempenhar o papel um do outro, mantendo suas missões e funções originais. Os resultados serão alcançados de forma satisfatória ao longo do tempo, à medida que o processo de relação entre os atores universidade-indústria-governo amadurece, bem como a própria natureza da governança (FARIA; KEKAS, 2016).

A influência positiva de uma forte estrutura gerencial na performance das empresas não é motivada pela prestação de serviços diretos às empresas, mas por contribuir para a criação de um ambiente propício à inovação, aumentar as redes de empreendedores, facilitar a transferência de tecnologia e melhorar reputação e imagem das empresas (ALBAHARI et al., 2018). É assim que as organizações intermediárias fazem com que a Triple Helix seja efetiva na construção de ecossistemas de empreendedorismo e inovação. É importante medir o impacto do empreendedorismo de base tecnológica em termos econômicos; no entanto, definir o que é e o que não é de alta tecnologia pode ser problemático (LÖFSTEN; LINDELÖF, 2001).

As organizações intermediárias atuam como pontes, facilitadores e catalisadores dentro do ecossistema da Tríplice Hélice, impulsionando a inovação e o desenvolvimento. Elas desempenham papéis diversos, desde a transferência de conhecimento e tecnologia até a formação de redes de colaboração e a influência em políticas de inovação. Etzkowitz e Loet Leydesdorff não reconhecem implicitamente a necessidade de mecanismos de mediação para facilitar a relação no modelo da Tríplice hélice, porém destacam a emergência de organizações que preenchem as lacunas entre as hélices.

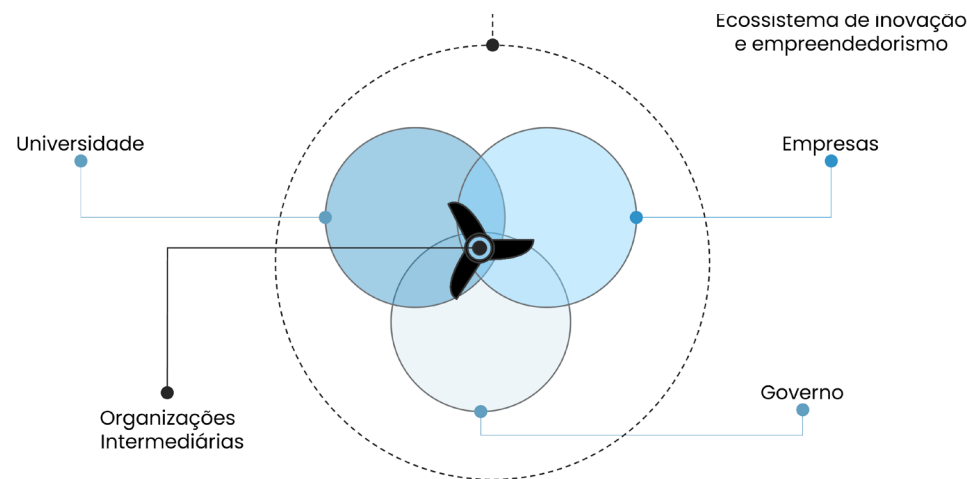


Figura: Representação de Elementos conceituais do modelo da Tríplice Hélice para a promoção da inovação tecnológica adaptado de Faria(2018)

4. A experiência da Fundep na articulação entre universidade, indústria e governo

A efetividade do modelo da Tríplice Hélice depende da existência de mecanismos capazes de transformar a interação entre universidade, indústria e governo em projetos concretos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Embora cada uma dessas esferas desempenhe funções complementares, diferenças de objetivos, linguagem, cultura organizacional e formas de atuação frequentemente dificultam a construção de iniciativas colaborativas. Nesse contexto, organizações intermediárias assumem papel estratégico ao estruturar a governança dessas relações, reduzir barreiras institucionais e criar ambientes favoráveis à cooperação tecnológica.

A experiência da Fundep, como coordenadora de três Programas Prioritários do Mover (Mobilidade Verde e Inovação), representa um exemplo de aplicação prática desse modelo. Atuando na interface entre governo, universidades, Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs) e setor produtivo, a Fundação tem contribuído para transformar políticas públicas de incentivo à inovação em projetos cooperativos voltados ao fortalecimento da competitividade da indústria brasileira.

Mais do que realizar a gestão administrativa dos recursos, a Fundep exerce uma função de articulação institucional. Sua atuação envolve a construção de editais de PD&I alinhados às demandas industriais, a mobilização de competências científicas distribuídas em diferentes universidades e centros de pesquisa, a aproximação entre empresas e pesquisadores, além do acompanhamento técnico e financeiro dos projetos ao longo de todo o seu ciclo de desenvolvimento. Esse modelo reduz a distância entre a produção do conhecimento científico e sua aplicação industrial, favorecendo a transferência de tecnologia e a geração de inovação.

No âmbito do programa Mover, essa atuação tem possibilitado a formação de redes nacionais de pesquisa envolvendo centenas de empresas, universidades e ICTs em torno de desafios estratégicos para a mobilidade sustentável. Desde 2019, os 130 projetos em execução e/ou concluídos possuem o envolvimento de mais de 100 ICTs e 200 empresas e centenas de pesquisadores e profissionais.

Essa experiência é particularmente relevante para o desenvolvimento de tecnologias relacionadas aos minerais críticos e materiais estratégicos. O domínio de processos de extração sustentável, beneficiamento mineral, metalurgia avançada, reciclagem de materiais, economia circular e neomineração exige elevados investimentos em infraestrutura científica, formação de recursos humanos especializados e interação contínua entre pesquisadores e empresas. Nenhum desses desafios pode ser superado por um único ator de forma isolada.

Ao coordenar ambientes colaborativos de inovação, a Fundep contribui para reduzir riscos tecnológicos, ampliar o compartilhamento de conhecimento e acelerar o amadurecimento de novas tecnologias. Esse processo favorece a transformação de resultados científicos em soluções aplicáveis à indústria, fortalecendo a capacidade nacional de desenvolver tecnologias próprias e agregar valor às cadeias produtivas de minerais estratégicos.

Além da articulação entre os atores da Tríplice Hélice, a experiência acumulada demonstra a importância da comunicação como elemento estruturante dos ecossistemas de inovação. A organização de chamadas públicas, workshops tecnológicos, vitrines de inovação, redes colaborativas, plataformas digitais de interação e ações de disseminação do conhecimento fortalece a circulação de informações entre os diferentes participantes do ecossistema, amplia a formação de novas parcerias e estimula o surgimento de projetos cooperativos. Dessa forma, a comunicação deixa de desempenhar apenas um papel institucional e passa a constituir um mecanismo de integração capaz de aproximar competências científicas e demandas industriais.

No contexto da crescente competição internacional por minerais críticos e materiais estratégicos, experiências como a desenvolvida pela Fundep demonstram que a competitividade não depende exclusivamente da disponibilidade de recursos naturais, mas da capacidade de organizar ecossistemas colaborativos capazes de integrar ciência, indústria e políticas públicas. A construção desses ambientes fortalece a soberania tecnológica nacional, amplia a agregação de valor aos recursos minerais brasileiros e cria condições para que o país avance de fornecedor de commodities para protagonista no desenvolvimento de tecnologias estratégicas voltadas à mobilidade do futuro.

5. Minerais críticos como agenda estratégica para a cooperação tecnológica

Os minerais críticos e os materiais estratégicos assumiram posição central nas políticas industriais e tecnológicas das principais economias do mundo. A expansão da mobilidade elétrica, das energias renováveis, da digitalização e das tecnologias de defesa ampliou significativamente a demanda por recursos como lítio, níquel, cobalto, grafite, terras raras e cobre. Entretanto, a competitividade das nações não dependerá apenas da disponibilidade desses recursos naturais, mas, sobretudo, da capacidade de desenvolver tecnologias para seu beneficiamento, processamento, reciclagem e aplicação em produtos de alto valor agregado.

Esse cenário transforma os minerais críticos em uma agenda estratégica de inovação. O desenvolvimento de novas rotas de extração sustentável, metalurgia avançada, materiais para baterias, ímãs permanentes, semicondutores, economia circular e neomineração exige elevados investimentos em pesquisa, infraestrutura tecnológica e formação de recursos humanos altamente qualificados. Trata-se de um conjunto de desafios científicos e industriais que ultrapassa a capacidade de atuação isolada de empresas, universidades ou governos, demandando ambientes permanentes de cooperação tecnológica.

Nesse contexto, o modelo da Tríplice Hélice oferece uma estrutura capaz de integrar competências complementares. Universidades e Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs) contribuem com a geração de conhecimento científico e o desenvolvimento de novas tecnologias; a indústria direciona esforços para validação, escalonamento e inserção das soluções no mercado; enquanto o governo cria políticas públicas, instrumentos regulatórios e mecanismos de financiamento que reduzem riscos e estimulam investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Essa interação fortalece ecossistemas colaborativos e acelera a transformação do conhecimento em inovação.

O Brasil reúne condições favoráveis para consolidar esse modelo de cooperação. Além de possuir importantes reservas de minerais estratégicos, conta com universidades e centros de pesquisa de excelência, uma matriz elétrica predominantemente renovável e uma indústria automotiva relevante no cenário internacional. Entretanto, transformar essas vantagens em competitividade exige fortalecer mecanismos de integração entre ciência, indústria e governo, ampliando programas cooperativos de PD&I, laboratórios compartilhados, redes nacionais de pesquisa e iniciativas de inovação aberta capazes de desenvolver tecnologias de maior valor agregado.

Mais do que garantir o fornecimento de matérias-primas para a transição energética, a agenda dos minerais críticos representa uma oportunidade para fortalecer a soberania tecnológica e a competitividade industrial brasileira. O diferencial competitivo estará na capacidade de agregar conhecimento aos recursos minerais, desenvolver tecnologias proprietárias, formar capital humano especializado e estruturar cadeias produtivas sustentáveis. Nesse cenário, a cooperação entre universidade, indústria e governo torna-se um elemento estratégico para posicionar o Brasil como protagonista no desenvolvimento de materiais e tecnologias essenciais para a mobilidade do futuro.

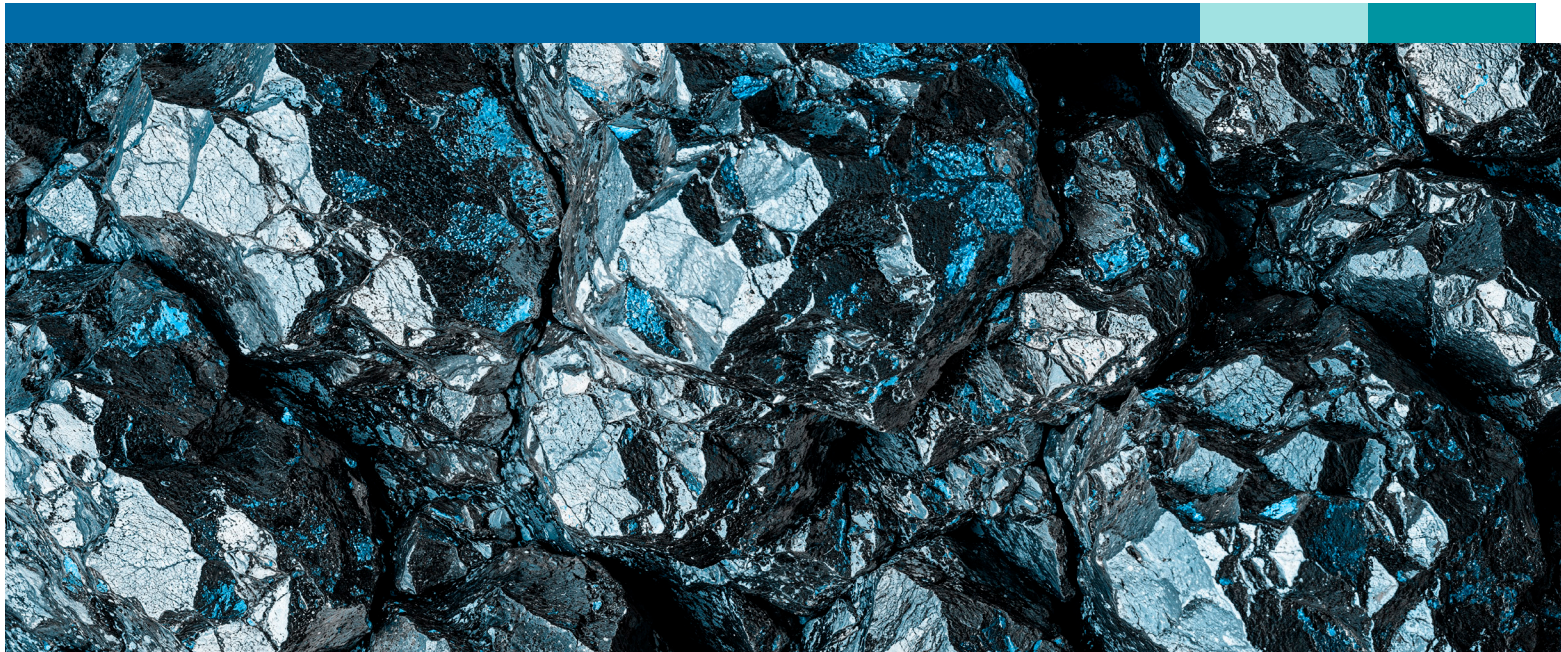
6. Considerações finais

A competitividade da indústria da mobilidade será cada vez menos determinada apenas pela disponibilidade de recursos naturais e cada vez mais pela capacidade de transformar esses recursos em conhecimento, tecnologia e inovação.

Nesse processo, o modelo da Tríplice Hélice oferece uma estrutura capaz de integrar ciência, indústria e políticas públicas em torno de objetivos comuns de desenvolvimento tecnológico.

A experiência acumulada pela Fundep na coordenação dos Programas Prioritários do Mover demonstra que organizações intermediárias podem desempenhar papel decisivo na construção desses ambientes colaborativos, promovendo a aproximação entre universidades, empresas e governo, reduzindo barreiras institucionais e acelerando a geração de soluções tecnológicas para desafios estratégicos da indústria brasileira.

No contexto dos minerais críticos e materiais estratégicos, fortalecer esses ecossistemas de inovação significa ampliar a capacidade nacional de desenvolver tecnologias próprias, agregar valor às cadeias minerais, estimular a industrialização de alto conteúdo tecnológico e consolidar a posição do Brasil como protagonista na transição para uma mobilidade mais sustentável, resiliente e tecnologicamente soberana.



Referências Bibliográficas

AMARAL, Marcelo. Revisitando, Redescobrimdo e Repensando a Triple Helix. In AS HÉLICES DA INOVAÇÃO: interação universidade-empresa-governo-sociedade no Brasil, CRV Editora, p.25-62, 2022.

BAÊTA, A. M. C.; BORGES, C.; TREMBLAY, D. G. Empreendedorismo internacional nas incubadoras: perspectivas e desafios. Revista de Negócios, Blumenau, v. 10, n. 2, p. 76-87, 2005.

CASSIOLATO, J. E.; LASTRES, H. M. M. Tecnoglobalismo e o papel dos esforços de P&D&I de multinacionais no mundo e no Brasil. Parcerias Estratégicas, Brasília, v. 20, n. 4, p. 1225-1246, 2005.

DAGNINO, R. A relação universidade-empresa no Brasil e o argumento da hélice tripla. Revista Brasileira de Inovação, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 267-307, 2003.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. The dynamics of innovation: from national systems "mode 2" to a tripe helix of university-industry-government relations. Research Policy, Amsterdam, v. 29, n. 2, p. 109-123, Apr. 2000.

FARIA, A. F.; RIBEIRO, J. D.; AMARAL, M. G.; SEDYAMA, J. A. Success factors and boundary conditions for technology parks in the light of the triple helix model. Journal of Business and Economics, v. 10, n. 1, p. 50-67, 2019.

FE, M. T. G. El Modelo de Triple Hélice de Relaciones Universidad, Industria y Gobierno: Un Análisis Crítico. ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura, p. 739-755, 2009. <http://10.3989/arbor.2009.738n1049>.

LÖFSTEN, H.; LINDELÖF, P. Science parks in Sweden – industrial renewal and development? R&D Management, v. 31, n. 3, p. 309-322, 2001.

PLONSKI, G. A. Cooperação empresa-universidade na Ibero-América: estágio atual e perspectivas. Revista de Administração, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 65-74, 1995.



Foto: Campus da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).



