

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - CAMPUS BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO HENRIQUE CORDEIRO MATOS

A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

PEDRO HENRIQUE CORDEIRO MATOS

A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Flávio Magno de Carvalho Fonseca.

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

M433e Matos, Pedro Henrique Cordeiro

A evolução dos materiais na indústria automobilística / Pedro Henrique Cordeiro Matos. – 2026.

60 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca

1. Indústria automobilística. 2. Automóveis - Materiais. 3. Ciência dos materiais. 4. Engenharia Mecânica. I. Matos, Pedro Henrique Cordeiro. II. Título.

CDU: 620.1



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 5 dias do mês de fevereiro do ano de 2026, às dezenove horas, nas dependências do IFMG - *Campus Betim*, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Flávio Magno de Carvalho Fonseca e demais membros, Evanilton José Alves Barbosa e Guilherme Lima José de Siqueira. Nesta ocasião o discente **Pedro Henrique Cordeiro Matos** do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0057614 do IFMG - *Campus Betim*, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "A Evolução Dos Materiais Na Indústria Automobilística" e foi APROVADO, com 80 (oitenta) pontos. Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso no desenvolvimento do TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

Betim, 04 de março de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Magno de Carvalho Fonseca, Professor**, em 18/03/2026, às 21:51, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Lima José de Siqueira, Professor Visitante**, em 19/03/2026, às 09:31, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Evanilton Jose Alves Barbosa, Professor**, em 19/03/2026, às 10:23, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2640392** e o código CRC **B4B66EB2**.

Dedico esta conquista à minha base: minha mãe, meus avós, meus irmãos e aos meus tios. Amo vocês infinitamente.

Ao meu amor, pela compreensão, pelo incentivo diário e por ser meu refúgio nos dias difíceis.

Aos meus amigos de escola e de graduação, obrigado por tornarem o fardo mais leve e a caminhada mais divertida.

RESUMO

A indústria automobilística apresenta forte relação com a evolução da engenharia de materiais, uma vez que o desempenho, a segurança, a eficiência energética e a sustentabilidade dos veículos dependem diretamente dos materiais empregados em sua fabricação. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a evolução dos materiais utilizados na indústria automobilística, comparando materiais tradicionais e materiais modernos, bem como discutir suas aplicações em veículos convencionais e elétricos. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica, realizada por meio de artigos científicos, livros técnicos e relatórios institucionais, selecionados em bases de dados acadêmicas. Os estudos analisados permitiram identificar as principais propriedades que justificam a utilização de materiais como aço, ferro fundido, ligas metálicas, polímeros de engenharia, materiais compósitos e ligas leves. Os resultados evidenciam que os materiais tradicionais continuam relevantes devido ao baixo custo, elevada resistência mecânica e facilidade de processamento. Entretanto, os materiais modernos destacam-se pela melhor relação resistência-peso, maior resistência à corrosão e contribuição para a redução da massa veicular, atendendo às exigências atuais de eficiência energética e sustentabilidade. Observou-se ainda que os veículos elétricos impulsionam a adoção de novos materiais, especialmente em sistemas de baterias, estruturas de proteção térmica e componentes eletrônicos. Conclui-se que a indústria automobilística adota uma abordagem híbrida, integrando materiais tradicionais e modernos de acordo com a função de cada componente. As perspectivas futuras indicam que a engenharia de materiais continuará sendo um fator determinante para o desenvolvimento de veículos mais leves, seguros, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: indústria automobilística; evolução dos materiais; engenharia dos materiais; veículos elétricos; sustentabilidade.

ABSTRACT

The automotive industry is strongly related to the evolution of materials engineering, since vehicle performance, safety, energy efficiency and sustainability depend directly on the materials used in manufacturing. In this context, this study aimed to analyze the evolution of materials applied in the automotive industry, comparing traditional and modern materials, as well as discussing their applications in conventional and electric vehicles. The methodology was based on a bibliographic review, using scientific articles, technical books and institutional reports selected from academic databases. The analyzed studies allowed the identification of the main properties that justify the use of materials such as carbon steel, cast iron, metallic alloys, engineering polymers, composite materials and lightweight alloys. The results show that traditional materials remain relevant due to their low cost, high mechanical strength and ease of processing. However, modern materials stand out for their improved strength-to-weight ratio, higher corrosion resistance and contribution to vehicle weight reduction, meeting current demands for energy efficiency and sustainability. It was also observed that electric vehicles promote the adoption of new materials, especially in battery systems, thermal protection structures and electronic components. It is concluded that the automotive industry adopts a hybrid approach, integrating traditional and modern materials according to the function of each component. Future perspectives indicate that materials engineering will remain a key factor in the development of lighter, safer, more efficient and environmentally responsible vehicles.

Keywords: automotive industry; materials evolution; materials engineering; electric vehicles; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Chevrolet Impala típico dos anos 60.....	13
Figura 2- Fluxo de Produção do aço.....	14
Figura 3- Automóvel com várias partes fabricadas em aço indicando as longarinas.	15
Figura 4- Efeito do tratamento térmico e da conformação mecânica no comportamento mecânico de aços de médio carbono.....	16
Figura 5- Cabeçote de motor	17
Figura 6- Tipos de Ferros Fundidos- Conforme sua microestrutura.....	18
Figura 7- Processo de produção do alumínio (Processo Bayer).....	20
Figura 8- Processo de manufatura e passivação de flocos de alumínio	21
Figura 9- Alumínio anodizado	23
Figura 10- Evolução da composição de materiais em automóveis (1960-2000).....	24
Figura 11- Polímeros naturais.....	26
Figura 12- Polímeros sintéticos.....	26
Figura 13- Comportamento Tensão-Deformação para polímeros	27
Figura 14- Materiais compósitos	28
Figura 15- Uso de materiais compósitos em automóveis.	29
Figura 16- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de três aços dual phase comerciais.	31
Figura 17- Fluxograma representativo da seleção de artigos	36
Figura 18- Quantidade de artigos por ano	40
Figura 19- Percentual de artigos selecionados por país de publicação	41
Figura 20- Comparação do peso em ordem de marcha de veículos topo de linha: décadas de 1970/1980 e modelos atuais	44
Figura 21- Aplicação de aços avançados da carroceria automotiva para redução de espessura.....	45
Figura 22- Densidade Média dos materiais.....	47
Figura 23- BMW I3.....	49
Figura 24- Cayman GT4 Clubsport.....	50
Figura 25- Fiat Uno Ecology	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fontes bibliográficas selecionadas	38
Tabela 2- Comparação entre materiais tradicionais e modernos na indústria automotiva.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHSS – Aços Avançados de Alta Resistência

CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)

DP – *Dual Phase* (Aço de Dupla Fase)

EV – *Electric Vehicle* (Veículo Elétrico)

LIDAR – *Light Detection and Ranging* (Detecção e Medição por Luz e Distância)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa – Megapascal

PP – Polipropileno

SAE – Society of Automotive Engineers

SUV- *Sport Utility Vehicle* (Veículo Utilitário Esportivo)

TIM – *Thermal Interface Material* (Material de Interface Térmica)

TRIP – *Transformation Induced Plasticity* (Plasticidade Induzida por Transformação)

UHSS – *Ultra-high Strength Steel* (Aço de Ultra Alta Resistência)

VE – Veículo Elétrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivos.....	11
1.2.1	Objetivo Geral.....	11
1.2.2	Objetivos Específicos.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	Histórico da Indústria Automobilística	12
2.2	Materiais Tradicionais e Suas Características	13
2.2.1	Aço	14
2.2.2	Ferro Fundido	16
2.2.3	Alumínio.....	19
2.3	Materiais modernos.....	23
2.3.1	Polímeros	24
2.3.2	Materiais Compósitos	27
2.4	Materiais Avançados	30
2.4.1	Aços avançados (AHSS)	30
2.5	Materiais para veículos eletrificados.....	31
2.6	Tendências Futuras.....	32
3	METODOLOGIA.....	35
4	RESULTADOS	38
4.1	Artigos Selecionados	38
4.2	Propriedades de materiais tradicionais e materiais modernos	42
4.3	Perspectivas para o futuro dos materiais na indústria automobilística.....	47
5	CONCLUSÃO.....	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A trajetória da indústria automobilística está totalmente ligada com a história da engenharia de materiais e sua evolução. Desde os primeiros carros protótipos no final do século XIX até os veículos contemporâneos mais leves e eletrificados, houve uma mudança drástica na composição física dos automóveis e dos materiais utilizados. Conforme aponta Shackelford (2008), a construção veicular era dominada quase exclusivamente por metais ferrosos como o aço e o ferro fundido que eram amplamente utilizados e escolhidos pela disponibilidade e facilidade de processamento na época. Durante o período de consolidação da produção em massa, descrito por Womack, Jones e Roos (1990), esses materiais mantiveram sua predominância porque atendiam bem aos requisitos de padronização e baixo custo das linhas de montagem fordistas.

No entanto, o decorrer do século XX trouxe avanços significativos na metalurgia e na química de polímeros. Callister (2008) observa que o desenvolvimento de novas ligas e materiais sintéticos permitiu aos engenheiros explorar alternativas que antes não existiam. O automóvel deixou de ser um produto feito apenas de aço para se tornar um sistema híbrido, incorporando alumínio, plásticos de engenharia e, mais recentemente, compósitos avançados.

Essa transição não ocorreu de uma vez, mas foi um processo contínuo de substituição e aprimoramento. O presente trabalho propõe-se a realizar uma revisão bibliográfica para mapear essa evolução. O foco está em identificar quais materiais eram utilizados no passado, quais são utilizados hoje e quais as propriedades técnicas que justificaram essas modificações ao longo das décadas.

1.1 Justificativa

A realização deste trabalho justifica-se pela necessidade de sistematizar o conhecimento sobre a evolução tecnológica dos insumos automotivos. A indústria passou por diversas fases, e em cada uma delas, a escolha da matéria-prima foi determinante para as características do veículo final. Compreender essa "linha do tempo" dos materiais saindo do aço carbono básico para ligas complexas e polímeros permite uma visão clara do progresso da engenharia.

Portanto, esta revisão bibliográfica é relevante para agrupar e exemplificar as modificações ocorridas, servindo como uma síntese técnica que compara as características dos materiais tradicionais com as inovações modernas. O estudo busca esclarecer como a ciência dos materiais impulsionou as mudanças na manufatura dos automóveis, documentando as substituições que definiram o estado dos carros atuais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica sobre a evolução histórica e técnica dos materiais na indústria automobilística, verificando e exemplificando as principais modificações e substituições de matérias-primas ocorridas desde o início da produção veicular até o cenário atual.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Descrever o contexto histórico da indústria automobilística, identificando os materiais predominantes nas fases iniciais.
- Caracterizar os materiais tradicionais, detalhando suas propriedades e motivos de sua ampla utilização histórica.
- Exemplificar a introdução de materiais modernos, comparando suas características com os materiais antigos.
- Demonstrar as tendências atuais de aplicação de materiais em novos componentes, como em veículos eletrificados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico da Indústria Automobilística

A evolução da indústria automobilística está diretamente relacionada ao avanço dos materiais utilizados em sua fabricação. Quando se analisa o final do século XIX, marcado pela patente de Karl Benz em 1886, nota-se que a engenharia operava sob severas limitações técnicas. A predominância de metais ferrosos na estrutura dos primeiros veículos não decorria de uma preferência, mas de uma imposição econômica (Como foi Ilustrado na Figura 1). Conforme aponta Shackelford (2008), o aço e o ferro fundido eram, na prática, as únicas opções capazes de entregar resistência mecânica a um custo de extração aceitável, definindo assim a arquitetura robusta e pesada daquela era.

Essa lógica sofreu sua primeira grande ruptura em 1913, com o advento do Fordismo. Ao introduzir a linha de montagem móvel, Henry Ford não apenas acelerou a produção, mas criou uma certa padronização. Womack, Jones e Roos (1990) observam que a substituição de peças o coração do sistema fordista exigia materiais com comportamento homogêneo. O aço carbono consolidou sua hegemonia justamente por atender a essa demanda: era previsível, permitindo estampagens repetitivas e soldagens consistentes em alta velocidade.

A falta de mudança desse modelo só foi quebrada pelo choque do petróleo na década de 1970. De repente, o peso excessivo do veículo, antes sinônimo de robustez, tornou-se o vilão da eficiência energética e econômica. De acordo com SAE International (2015) que evidencia que foi durante esse cenário de crise que se iniciou a mudança real para materiais diversos e alternativos, como o alumínio e os polímeros, ocupando espaços antes exclusivos do ferro.

Atualmente, a eletrificação dos veículos impõe novas normas e encargos. A National Academy of Engineering (2013) afirma que a viabilidade do carro elétrico depende da compensação da massa das baterias. O alívio de peso no chassi deixou de ser opcional; tornou-se um imperativo de engenharia. Materiais antes restritos à indústria aeronáutica como a fibra de carbono e os aços avançados (AHSS) são hoje a resposta técnica para equilibrar a difícil equação de autonomia e segurança.

Figura 1-Chevrolet Impala típico dos anos 60.



Fonte: Poster Lounger (2020).

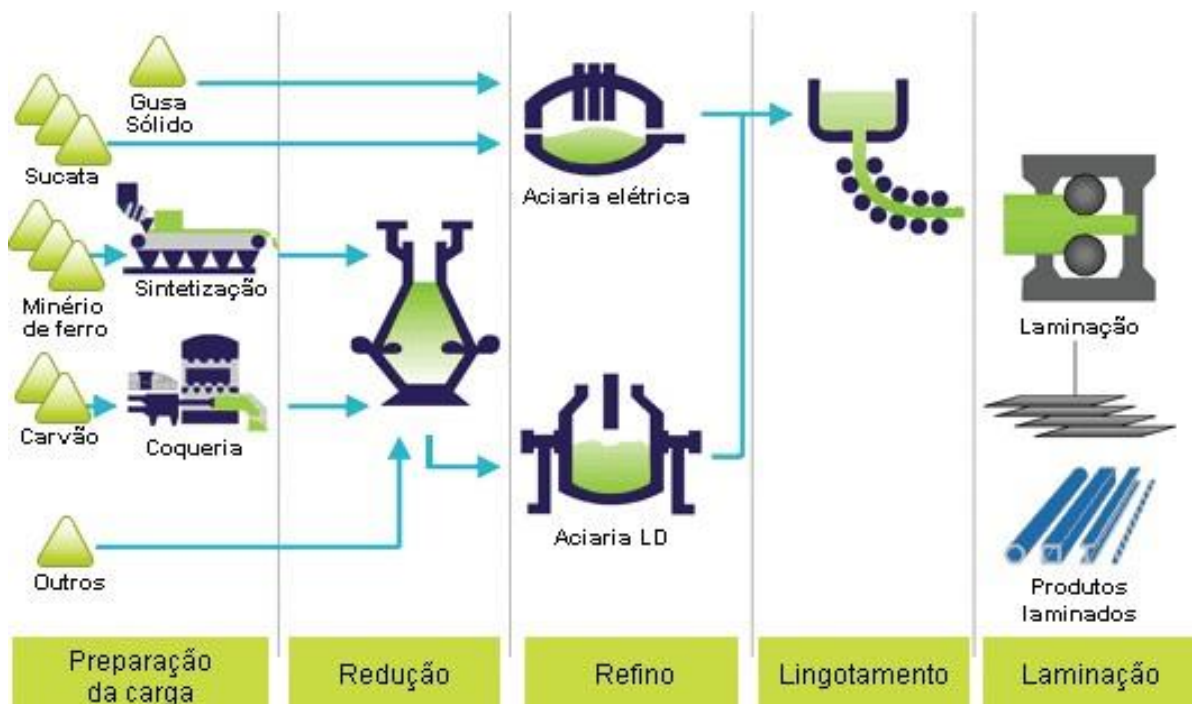
2.2 Materiais Tradicionais e Suas Características

No desenvolvimento para o setor automotivo, a definição da matéria-prima não é apenas uma escolha técnica, mas uma decisão que impacta todo o ciclo de vida do projeto. Segundo a metodologia de seleção proposta por Ashby (2011), deve-se buscar um compromisso entre o desempenho mecânico esperado e a viabilidade de fabricação. Nesse contexto, materiais já consagrados pela indústria continuam sendo a base para a maioria das aplicações de engenharia. A predominância do aço e do ferro na indústria metalmeccânica se justifica pela combinação de propriedades que dificilmente é encontrada em outros grupos de materiais com o mesmo custo.

2.2.1 Aço

Historicamente, a hegemonia do aço na indústria automobilística foi reforçada por sua relação custo-benefício imbatível. Tratava-se do único material capaz de conciliar baixo custo de aquisição com os requisitos técnicos de rigidez, soldabilidade e conformação em escala industrial. Contudo, Ashby e Jones (2007) apontam uma ruptura nesse paradigma: o endurecimento das legislações ambientais e a busca incessante por eficiência energética impuseram novos limites às emissões, compelindo as montadoras a investigar substitutos viáveis para as ligas ferrosas tradicionais. O fluxo de produção está demonstrado na Figura 2.

Figura 2- Fluxo de Produção do aço



Fonte: Marioteca UFSC (2016).

O aço é uma liga metálica formada basicamente por ferro e carbono, as porcentagens de carbono variam entre 0,008 e 2,11%, porém existem modificações devido a adição de outros elementos como: cromo, vanádio e magnésio. Essas composições deixam o material macio facilitando o processamento (CALLISTER, 2000).

Segundo Chiaverini (1977), a ampla utilização do ferro em todos os setores da engenharia justifica-se por sua característica polimórfica e pela facilidade de processamento. A Figura 3, ilustra um automóvel com várias partes fabricadas em aço. O autor define o aço como uma liga ferro-carbono que contém, além desses elementos principais, certos elementos residuais inerentes ao processo de fabricação. Quanto à sua classificação fundamental, Chiaverini (1977) divide os aços em dois grandes grupos. Os Aços Carbono, que se subdividem em baixo teor de carbono (C menor que 0,2%) e médio teor de carbono (entre 0,2% e 0,5%); e os Aços Liga, classificados em baixo teor de liga (quando a soma dos elementos é inferior a 8%) e alto teor de liga (quando superior a 8%). Na Figura 4 é ilustrado o Efeito do tratamento térmico e da conformação mecânica no comportamento mecânico de aços de médio carbono.

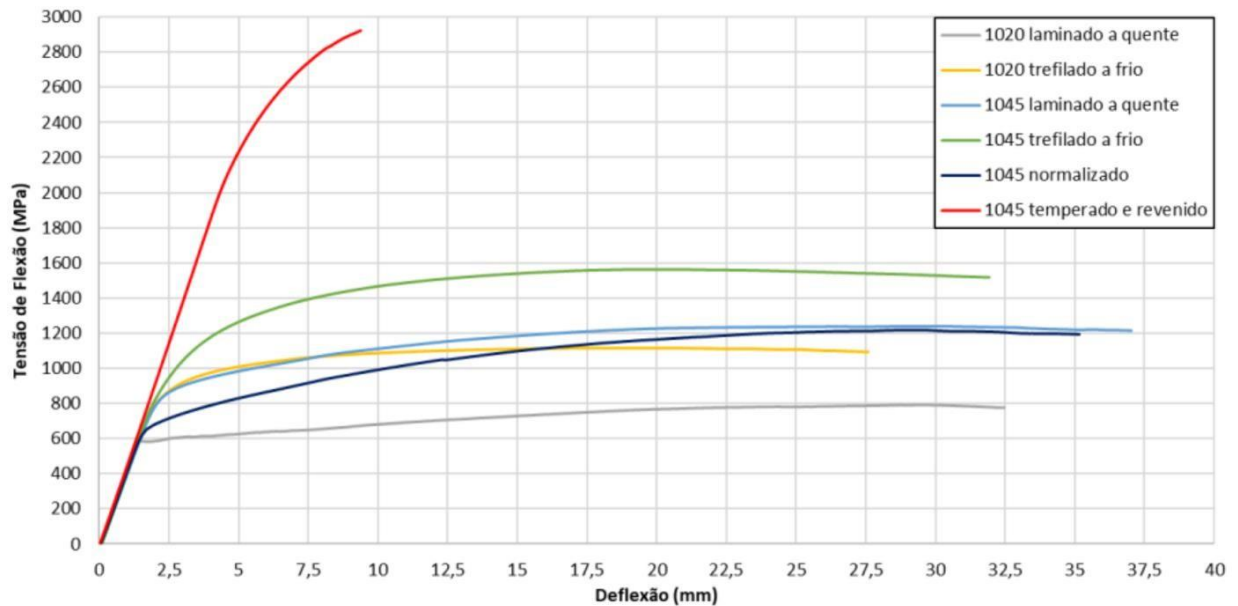
Callister e Rethwisch (2016) classificam os aços carbono em aços de baixo, médio e alto teor de carbono, sendo os aços de alto carbono aqueles que apresentam teor superior a aproximadamente 0,6%, podendo chegar a cerca de 1,4% em aplicações comerciais.

Figura 3- Automóvel com várias partes fabricadas em aço indicando as longarinas.



Fonte: AutoXP (2016).

Figura 4- Efeito do tratamento térmico e da conformação mecânica no comportamento mecânico de aços de médio carbono



Fonte: Bejo (2021).

2.2.2 Ferro Fundido

Chiaverini (1997) explica que, embora seja um material mais frágil em tração se comparado ao aço, ele apresenta uma característica singular: o amortecimento de vibrações. Somado à sua facilidade de conformação por fundição, torna-se o material ideal para bases de máquinas e blocos de motores, onde a rigidez estática é prioritária.

Os ferros fundidos constituem ligas de ferro e carbono, com concentrações de carbono variando entre 1,8% e 4,5%. Devido ao seu ponto de fusão comparativamente baixo (cerca de 1200°C), o processo produtivo demanda menos energia e facilita a moldagem, uma vez que o material em estado líquido preenche os moldes com grande fluidez. Além disso, destacam-se pelo custo reduzido e pela necessidade de menor usinagem final quando comparados aos aços (Van Vlack, 1984).

Historicamente, o uso de ferros fundidos restringia-se a componentes submetidos a baixos esforços de tração, flexão ou impacto, visto que os métodos de fabricação antigos resultavam em produtos frágeis. No entanto, o aprimoramento das técnicas de produção e controle de qualidade permitiu o desenvolvimento de peças com propriedades mecânicas superiores, uma aplicação é o do cabeçote do motor de automóveis como está ilustrado pela Figura 5. Essa evolução expandiu o campo de aplicação desses materiais, tornando-os viáveis até mesmo para usos anteriormente exclusivos de aços com médio teor de carbono (Colpaert, 1977).

Segundo Callister e Rethwisch (2016), os ferros fundidos apresentam maior capacidade de amortecimento de vibrações quando comparados aos aços, devido à presença de grafita em sua microestrutura. Essas partículas atuam como descontinuidades internas que promovem a dissipação da energia vibracional por meio de atrito interno, reduzindo a propagação das oscilações mecânicas.

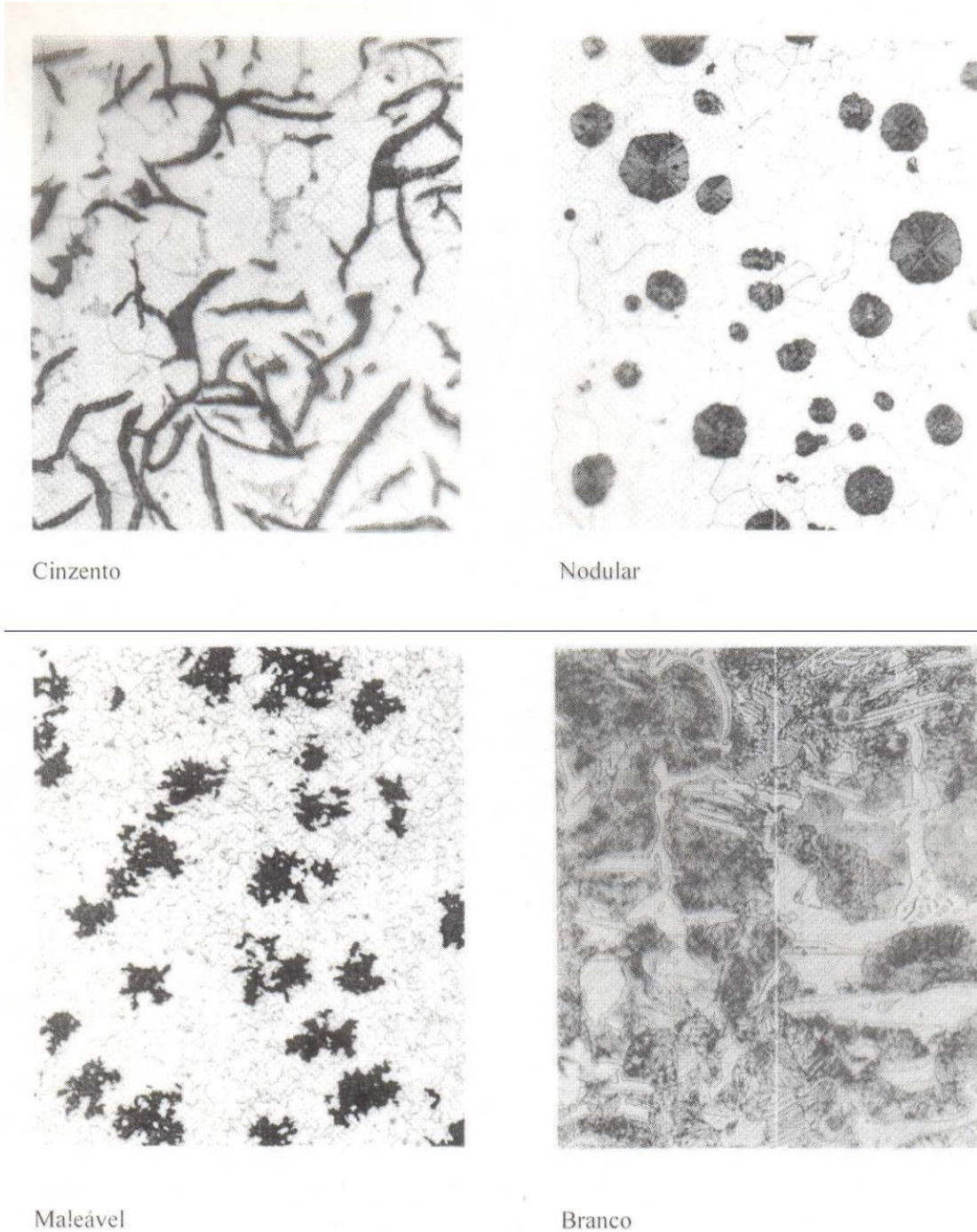
Figura 5- Cabeçote de motor



Fonte: MetropecasPR (2023).

No que se refere à classificação dos ferros fundidos, Chiaverini (1988) divide os ferros fundidos em seis categorias distintas: ferro fundido cinzento, branco, mesclado, maleável, nodular e vermicular (também conhecido como de grafita compactada). Como está ilustrado na Figura 6.

Figura 6- Tipos de Ferros Fundidos- Conforme sua microestrutura



Fonte: Callister (2000).

2.2.3 Alumínio

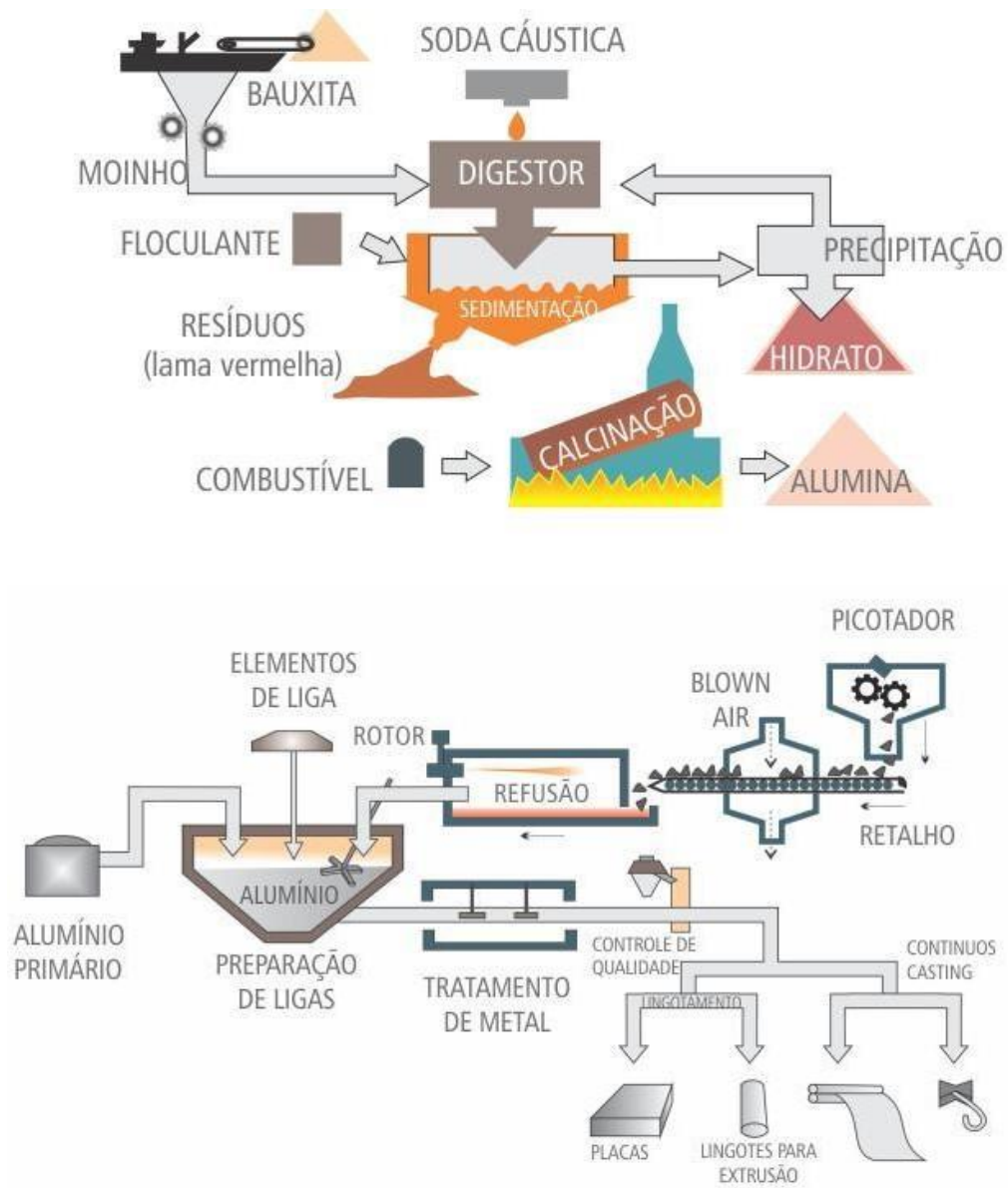
Quando o foco do projeto se desloca da resistência absoluta para a eficiência em relação ao peso específico, o alumínio assume o protagonismo. A densidade deste metal é, de acordo com Shackelford (2008), aproximadamente um terço da densidade do aço, o que permite reduções drásticas na massa final de veículos e estruturas móveis.

Outro ponto que merece destaque é a durabilidade sob condições ambientais adversas. Garcia (2016) detalha que o alumínio desenvolve naturalmente uma camada de óxido superficial (alumina) que age como uma barreira. Diferente do ferro, que se degrada progressivamente com a ferrugem, o alumínio utiliza essa oxidação inicial para estancar o processo corrosivo, processo também, chamado de passivação garantindo longevidade ao componente mesmo sem pinturas complexas.

O fenômeno da passivação apresenta elevada complexidade, o que faz com que suas explicações normalmente sejam abordadas de forma segmentada, considerando apenas etapas específicas do processo. De modo geral, o estudo da passivação pode ser organizado em diferentes fases: inicialmente ocorre a adsorção química do ar ou do oxigênio puro sobre a superfície do material; em seguida, há a formação e o desenvolvimento de uma película fina de óxido, cuja composição pode variar; posteriormente, ocorre a estabilização do processo, caracterizada pela saturação da camada formada; e, por fim, avalia-se a capacidade dessa superfície em resistir ou se degradar diante do meio corrosivo ao qual está exposta (RODRIGUEZ, 2003). Processo Byer (de produção do alumínio) foi ilustrado na Figura 7.

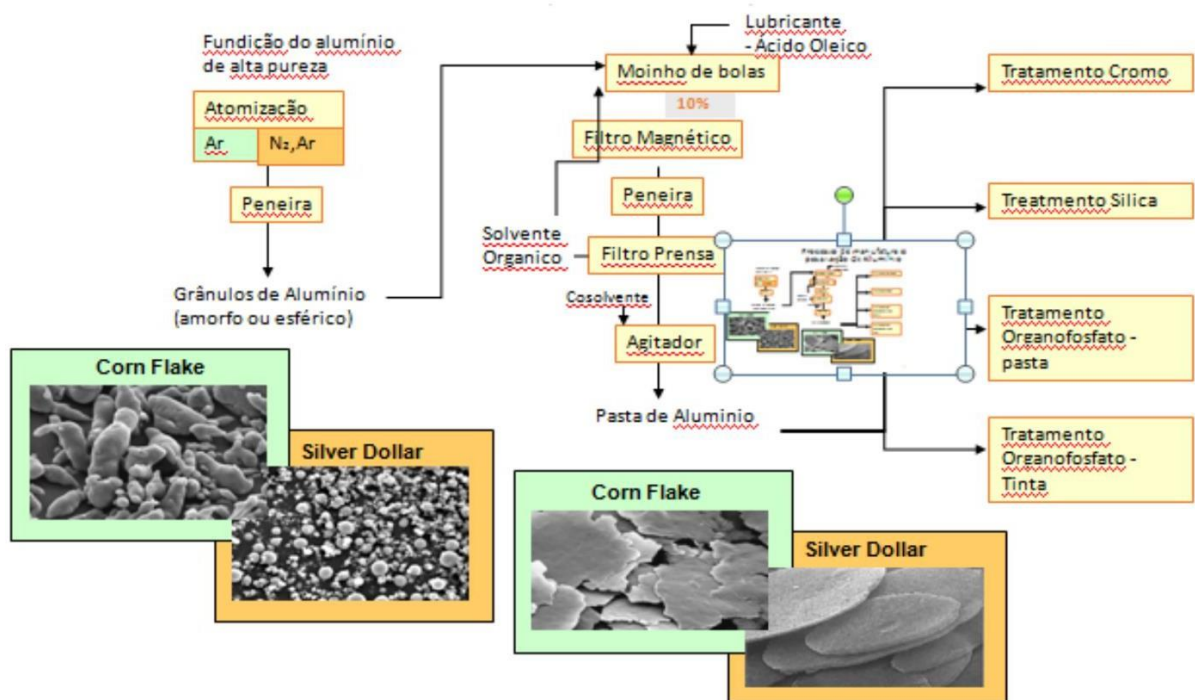
Processo de manufatura e passivação ilustrado na Figura 8.

Figura 7- Processo de produção do alumínio (Processo Bayer)



Fonte: GR3 Distribuidora (2015).

Figura 8- Processo de manufatura e passivação de flocos de alumínio



Fonte: DuPont (2017).

De acordo com a Revista Alumínio (2023), fundamentados em métricas da *Aluminum Association*, evidenciam que a substituição estratégica do aço pelo alumínio é um fator estratégico para a viabilidade dos veículos elétricos. A lógica é tanto técnica quanto econômica ao aliviar a massa da carroceria, obtém-se um ganho direto na autonomia sem a necessidade de superdimensionar o banco de baterias. Isso evita custos exponenciais com células de energia adicionais e permite uma otimização mais inteligente do espaço interno da cabine. Somado a isso, sua alta taxa de reciclabilidade alinha o componente aos princípios da economia circular, reduzindo a pegada de carbono global da manufatura (REVISTA ALUMÍNIO, 2023). Dessa forma, o material consolida-se não apenas como uma alternativa leve, mas como um pilar central para uma engenharia automotiva que busca equilibrar performance, custo e responsabilidade ambiental.

A engenharia de materiais moderna entende que a falha do componente frequentemente se inicia na superfície, tornando as tecnologias de tratamento

superficial tão vitais quanto o material base. Gentil (2011) argumenta que a proteção contra a corrosão não deve ser uma medida corretiva, mas sim preventiva, citando a galvanização como um método eficaz de proteção catódica para aços.

A anodização é um processo eletroquímico destinado à transformação controlada da superfície de um metal em uma camada de óxido, promovendo alterações significativas em suas propriedades físicas e químicas e na cor do material. Embora Buff, em 1857, já tenha demonstrado que a espessura do óxido natural do alumínio poderia ser ampliada por meios eletroquímicos, somente a partir de 1923 a técnica passou a ser explorada comercialmente, com o objetivo de aumentar a resistência à corrosão e à abrasão desse metal (BENGOUGH; STUART, 1924). Alumínio anodizado está ilustrado na Figura 9.

O processo de anodização baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial em uma célula eletrolítica, na qual o metal a ser tratado atua como ânodo. Essa condição promove a eletrólise da água, gerando íons de oxigênio que são atraídos para a superfície do ânodo. Como resultado, ocorre a oxidação controlada do metal, formando uma camada de óxido uniforme e aderente, responsável pela proteção superficial e pela melhoria das propriedades do material (GRUBBS, 2000).

Na mesma vertente, Garcia (2016) explora a anodização do alumínio não apenas como acabamento estético, mas como um processo eletrolítico que endurece a superfície, criando uma barreira cerâmica porosa que amplia a resistência ao desgaste e facilita a adesão de lubrificantes, garantindo assim a longevidade operacional do produto desenvolvido.

Figura 9- Alumínio anodizado



Fonte: Anodont (2025).

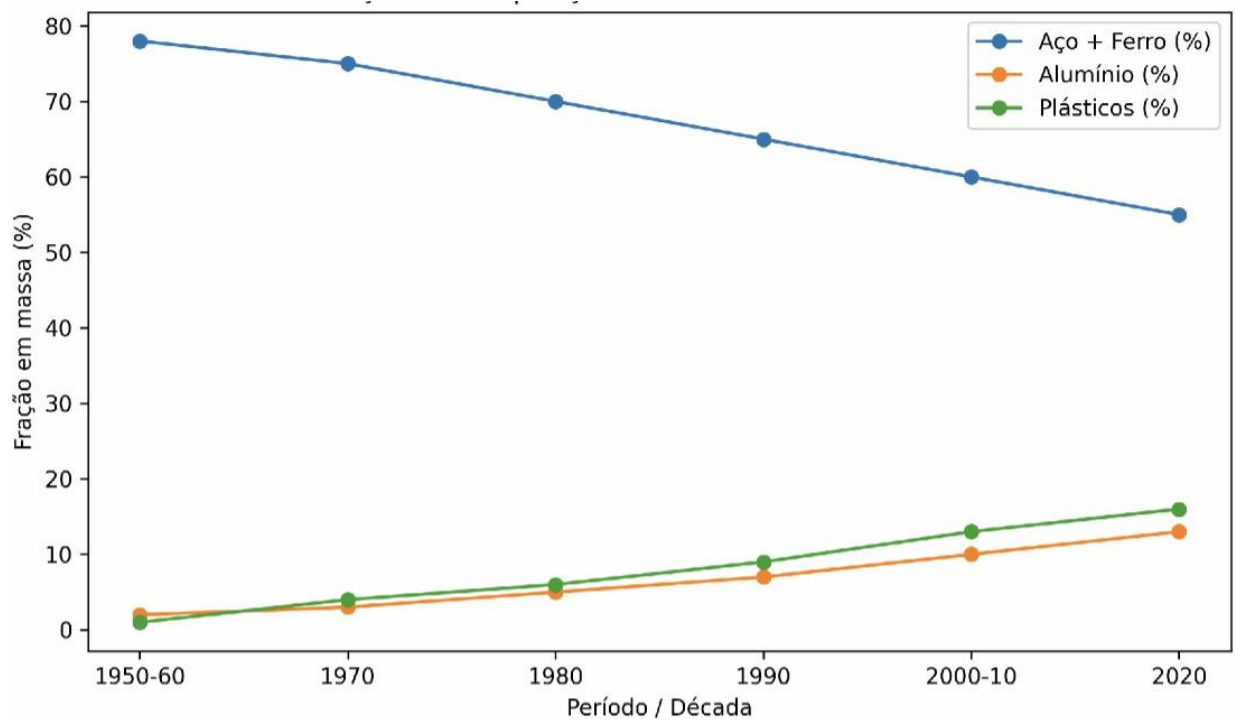
2.3 Materiais modernos

No cenário atual da engenharia, observa-se que a simples utilização de metais convencionais já não atende plenamente às demandas de projetos que exigem, simultaneamente, redução de massa e elevada tenacidade. Nesse contexto, a seleção de materiais passou a desempenhar um papel estratégico no desempenho estrutural e funcional dos sistemas de engenharia.

Conforme discutido por Ashby (2011), esse processo evoluiu de uma abordagem baseada predominantemente no custo para uma análise multicritério, na qual propriedades como densidade, resistência mecânica e rigidez específica tornam-se determinantes. Destaca-se, em particular, o módulo específico, definido como a razão entre o módulo de elasticidade (módulo de Young) e a densidade do material, por representar a capacidade de um material fornecer rigidez estrutural com o menor acréscimo de massa. Essa abordagem permite a comparação mais eficiente entre diferentes classes de materiais, viabilizando o desenvolvimento de soluções mais

leves e com elevado desempenho mecânico. A Figura 10 ilustra a Evolução da composição dos materiais na indústria.

Figura 10- Evolução da composição de materiais em automóveis (1960-2000)



Fonte: Adaptado de World Steel Association e U.S. Department of Energy (2017).

2.3.1 Polímeros

De acordo com Callister (2016), as propriedades dos polímeros, assim como de diversos materiais metálicos, são definidas por parâmetros como módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, além da resistência ao impacto e à fadiga. Essas características determinam o desempenho mecânico dos materiais em diferentes aplicações.

Segundo Dalmolin (2016), os polímeros apresentam baixa condutividade térmica e, quando submetidos a temperaturas elevadas, podem sofrer degradação térmica e cisão de suas cadeias moleculares. Esse processo resulta na redução

significativa da massa molar e no aumento da liberação de gases ou vapores químicos, comprometendo suas propriedades físicas e estruturais.

No que se refere às propriedades ópticas, Callister (2016) destaca que os polímeros amorfos ou com baixo grau de cristalinidade apresentam elevada transparência, permitindo a passagem de até 92% da luz incidente, como ocorre em plásticos comuns. Em contrapartida, polímeros com maior grau de cristalinidade tendem a se tornar translúcidos ou, em situações específicas, opacos.

Quevedo (2016) ressalta que a facilidade de processamento e manuseio dos polímeros contribuiu para sua ampla adoção industrial, promovendo avanços tecnológicos, econômicos e ambientais, principalmente em função da praticidade no descarte e na reciclagem. Os polímeros podem ser classificados segundo diversos critérios, sendo a divisão mais comum entre polímeros naturais e polímeros artificiais.

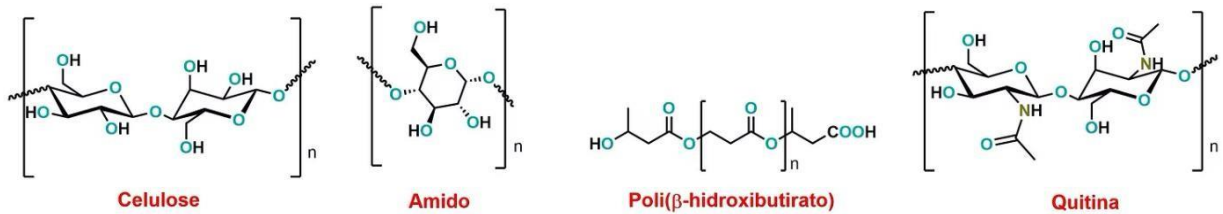
Conforme Fogaça (2017), os polímeros naturais são encontrados nos organismos animais e vegetais e vêm sendo utilizados pelo ser humano há milhares de anos (Ilustrados na Figura 11). Essas macromoléculas, conhecidas como biomoléculas ou moléculas da vida, são fundamentais para a manutenção dos processos biológicos e estão agrupadas em três principais classes: carboidratos, lipídios e proteínas.

Já os polímeros sintéticos (Ilustrados na Figura 12), segundo Quevedo (2013), passaram a ser produzidos em laboratório com o objetivo inicial de reproduzir as características dos polímeros naturais. O primeiro polímero sintético de grande relevância comercial foi o celuloide, desenvolvido em 1864, utilizado principalmente na fabricação de bolas de bilhar, substituindo o marfim, cujo custo era elevado na época.

Dentro dessa lógica, os polímeros de engenharia surgem como substitutos viáveis; diferentemente dos plásticos comuns, materiais como as poliamidas e o policarbonato apresentam cadeias moleculares ordenadas que garantem estabilidade dimensional sob carga. Callister e Rethwisch (2018) corroboram essa visão ao detalhar que tais polímeros, quando aplicados em componentes automotivos ou estruturais, oferecem uma resistência à fadiga superior à de muitas ligas não ferrosas, além de permitirem

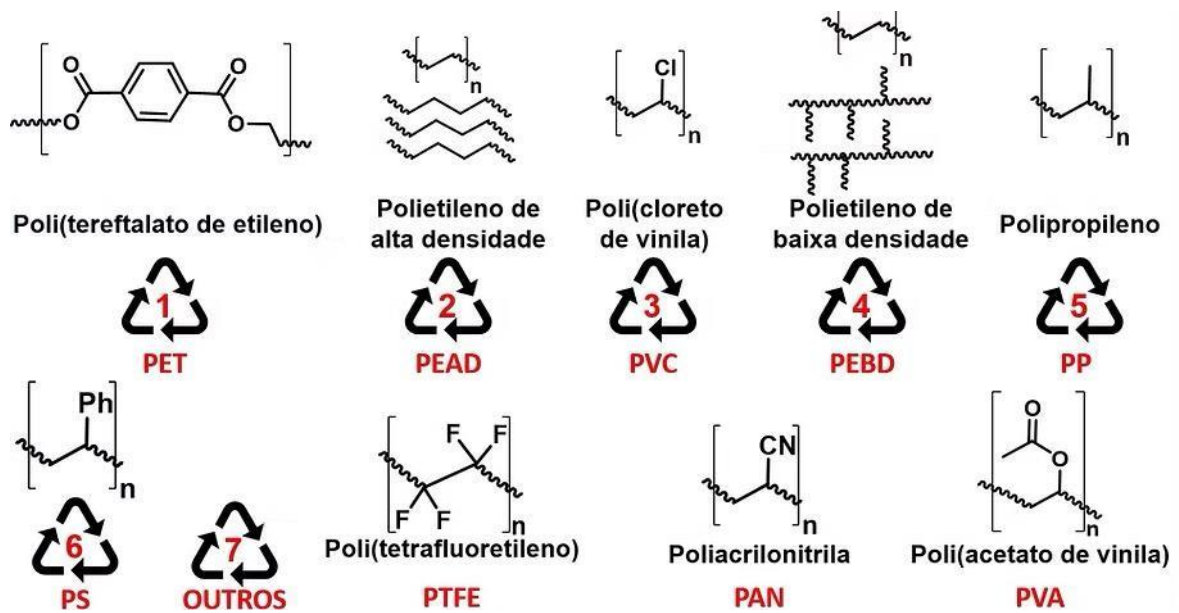
a manufatura de geometrias complexas sem a necessidade de usinagem posterior. O comportamento tensão deformação dos polímeros está ilustrado na Figura 13.

Figura 11- Polímeros naturais



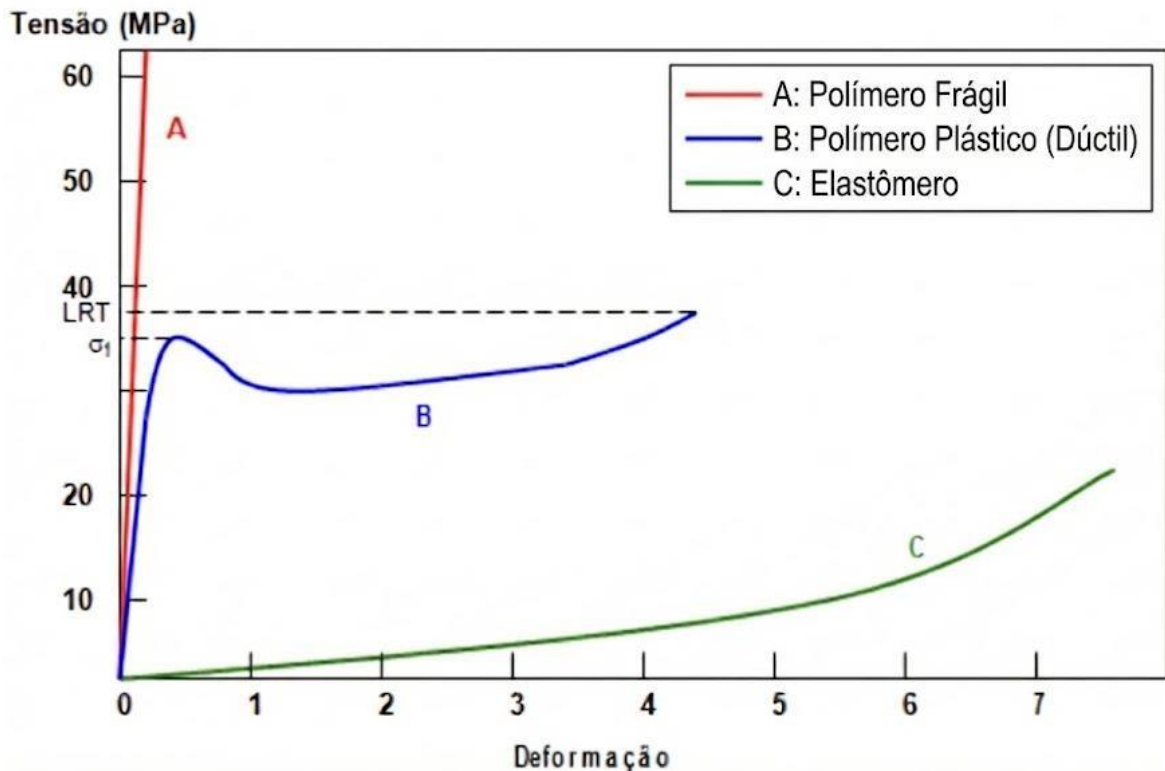
Fonte: Daniela Martins Group (2022).

Figura 12- Polímeros sintéticos



Fonte: Daniela Martins Group (2022).

Figura 13- Comportamento Tensão-Deformação para polímeros

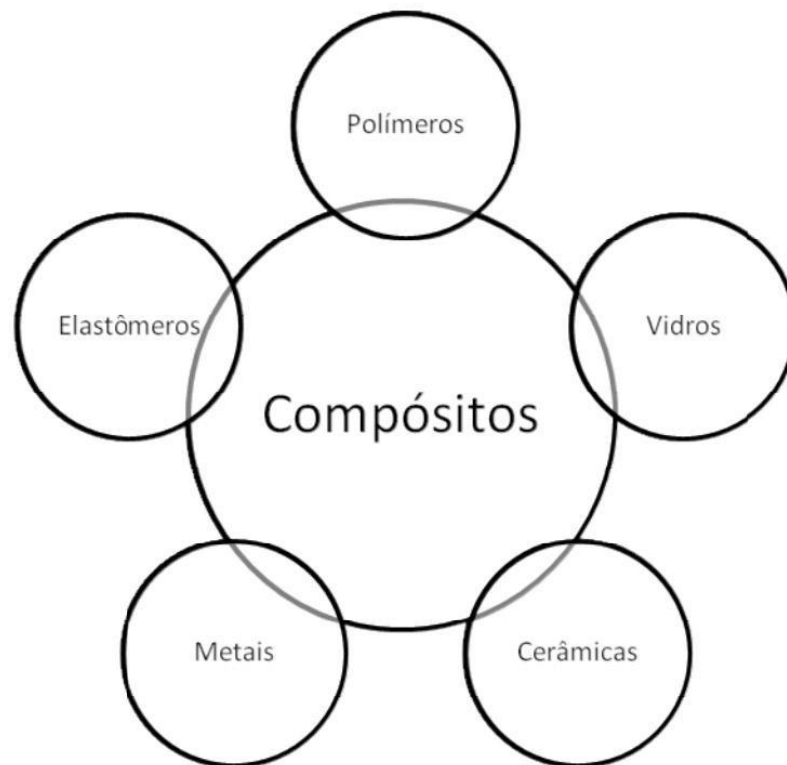


Fonte: Adaptado de Callister (2000).

2.3.2 Materiais Compósitos

Avançando na complexidade estrutural, encontram-se os materiais compósitos, que constituem uma classe onde a heterogeneidade é proposital (Ilustrado na Figura 14, que mostra os materiais que podem se combinar a matriz do material). Chawla (2012) define esses materiais como a combinação sinérgica entre uma matriz, geralmente polimérica, e um reforço fibroso. No caso da fibra de vidro, obtém-se um ganho de resistência à tração significativo a um custo moderado; contudo, para aplicações críticas como na indústria aeroespacial, a fibra de carbono é o padrão de referência devido à sua rigidez excepcional em relação ao peso. É imperativo notar que, paralelamente aos não-metálicos, a metalurgia também progrediu. Shackelford (2008) aponta o desenvolvimento de ligas metálicas avançadas, como as superligas de níquel e os aços de ultra-alta resistência (UHSS), projetados especificamente para manter a integridade mecânica em temperaturas onde ligas convencionais sofreriam fluência ou oxidação severa.

Figura 14- Materiais compósitos



Fonte: Adaptado de Gobbi (2013).

No contexto da indústria automotiva, Wiebeck e Harada (2005) apontam que as fibras de vidro lideram a aplicação como reforço em compósitos de matriz polimérica, seguidas de perto pelas cargas de talco. Embora o custo reduzido seja um atrativo, a preferência por esses materiais fundamenta-se, sobretudo, no equilíbrio de suas propriedades técnicas: eles combinam alta resistência à tração e ao impacto com um baixo coeficiente de dilatação térmica, além de oferecerem excelente flexibilidade para a conformação de peças complexas e facilidade de manutenção.

Ainda segundo os autores, o desempenho desses compósitos depende intrinsecamente das funções desempenhadas pela matriz polimérica. Cabe a ela não apenas aglutinar os reforços, mas atuar como o meio de transferência de esforços, distribuindo as tensões aplicadas para as fibras as quais devem possuir módulo de elasticidade superior ao da matriz. Adicionalmente, a fase polimérica protege os filamentos contra abrasão mecânica e degradação química ambiental. Devido à sua maior ductilidade e plasticidade relativa, a matriz atua também como uma barreira

física, interrompendo a propagação de trincas entre as fibras e evitando falhas catastróficas.

Essa interação é corroborada por Callister (2007), que destaca a capacidade da fibra de vidro de gerar compósitos com elevadíssima resistência mecânica específica quando incorporada a plásticos. É essa característica que impulsiona o uso crescente de plásticos reforçados em carrocerias veiculares, visando a redução de massa e o consequente aumento da eficiência energética. O uso dos compósitos em automóveis está ilustrado na Figura 15.

Por fim, no que tange ao uso do talco (silicato de magnésio hidratado), Guedes e Filkauskas (1986) ressaltam sua importância como reforço para o Polipropileno (PP). A adição deste mineral, em frações volumétricas de 10% a 40%, resulta em um aumento significativo da rigidez e da temperatura de deflexão térmica do polímero. Vale notar que o talco preserva as resistências à tração e compressão, ao mesmo tempo em que aprimora o acabamento superficial da peça final, reduz a contração de moldagem e facilita a mistura com outros compostos.

Figura 15- Uso de materiais compósitos em automóveis.



Fonte: Adaptado de MTS Systemes (2020).

2.4 Materiais Avançados

Materiais avançados são aqueles desenvolvidos ou aperfeiçoados a partir de avanços científicos e tecnológicos, apresentando propriedades superiores às dos materiais tradicionais, como maior resistência mecânica, menor massa, melhor desempenho térmico e elétrico, além de maior eficiência energética e sustentabilidade, sendo amplamente utilizados em setores como a indústria automotiva, aeroespacial e eletrônica (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

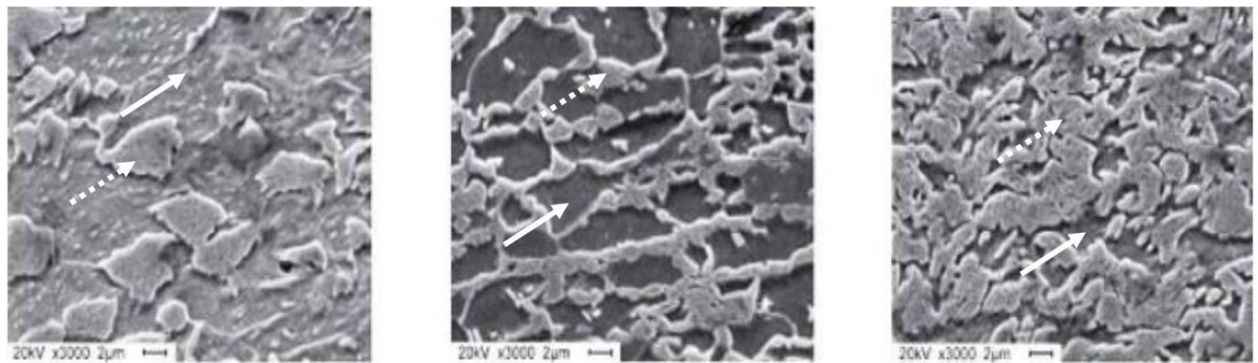
2.4.1 Aços avançados (AHSS)

A resposta da indústria automobilística às demandas por redução de massa e aumento da segurança de automóveis materializou-se no desenvolvimento dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS – *Advanced High-Strength Steels*). Diferentemente dos aços convencionais, cuja resistência é obtida primariamente pelo teor de carbono e elementos de liga solúveis, os AHSS fundamentam suas propriedades em um controle meticuloso da microestrutura multifásica. Segundo Keeler e Kim (2015), essa classe de materiais rompe o "paradoxo da resistência-ductilidade" historicamente, aumentar a resistência de um metal significava torná-lo frágil; contudo, através de mecanismos como o endurecimento por transformação de fase, os AHSS conseguem oferecer limites de resistência mecânica superiores a 1000 MPa mantendo, simultaneamente, níveis de conformabilidade adequados para a estampagem de peças complexas.

No contexto da engenharia automotiva, os aços de dupla fase (DP – *Dual Phase*) (Microestrutura dos aços Dual Phase, ilustrados na Figura 16) e os aços com plasticidade induzida por transformação (TRIP – *Transformation Induced Plasticity*) assumiram papel preponderante. Matlock e Speer (2009) explicam que os aços DP consistem em uma matriz ferrítica macia (que garante a conformabilidade) dispersa com ilhas de martensita dura (que confere resistência). Já os aços TRIP utilizam a austenita retida metaestável que, sob a deformação de um impacto, transforma-se em martensita, absorvendo uma quantidade massiva de energia. Essa característica é vital para a integridade da célula de sobrevivência do veículo (*crashworthiness*),

permitindo o uso de chapas mais finas e consequentemente mais leves em colunas e vigas de impacto, sem comprometer a segurança dos ocupantes.

Figura 16- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de três aços *dual phase* comerciais.



(a) DP 600, (b) DP 800, (c) DP 1000.

Fonte: WANG e WEI (2013).

A implementação desses materiais, no entanto, impõe desafios de manufatura. Kuziak et al. (2008) ressaltam que a elevada resistência dos AHSS resulta em um fenômeno de retorno elástico (*springback*) acentuado após a estampagem, exigindo ferramentas de design preditivo e simulações computacionais robustas para garantir a precisão dimensional. Assim, os AHSS não representam apenas uma evolução material, mas exigiram a modernização de toda a cadeia de ferramentaria e soldagem da indústria automotiva.

2.5 Materiais para veículos eletrificados

A inovação tecnológica representada pela eletrificação dos motores automotivos e pela introdução de sistemas de condução autônoma reconfigurou drasticamente o espectro de prioridades na seleção de materiais. Nos veículos elétricos, o invólucro protetor das baterias tornou-se um dos componentes de maior complexidade no design automotivo atual. Segundo Eede (2020), este subsistema vive um conflito técnico evidente, pois precisa oferecer uma robustez mecânica extrema para garantir a integridade do módulo de energia em impactos, ao mesmo tempo em que necessita ser o mais leve possível para não comprometer a autonomia do veículo.

Para equacionar esse dilema de engenharia, Pouzada (2018) observa uma mudança clara na indústria, que vem abandonando progressivamente o aço estampado em favor de ligas de alumínio da série 6000 e, em aplicações de alta performance, de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono (CFRP). Essa substituição estratégica permite manter a rigidez estrutural necessária reduzindo significativamente a massa total do conjunto.

De acordo com, Tie et al. (2020) destacam o papel fundamental dos Materiais de Interface Térmica, tecnicamente conhecidos como TIMs. Estes materiais, geralmente compostos por pastas cerâmicas ou elastômeros condutivos, são inseridos entre as células da bateria para atuar como pontes térmicas eficientes. Sua função primária é extrair o calor gerado durante a carga e descarga e direcioná-lo para o sistema de refrigeração, evitando o superaquecimento crítico denominada fuga térmica (*thermal runaway*), que poderia resultar em falhas catastróficas ou incêndios.

Paralelamente, a infraestrutura elétrica de alta tensão impôs uma revisão dos condutores metálicos. Embora o cobre ostente a primazia na condutividade elétrica, Facchinetti et al. (2016) demonstram que sua alta densidade ($8,96 \text{ g/cm}^3$) o torna inviável para o cabeamento massivo de um VE (Veículo Eletrificado) moderno. A tendência consolidada, conforme os autores, é a substituição por ligas de alumínio em cabos de potência; mesmo exigindo seções transversais maiores para conduzir a mesma corrente, o alívio de peso global na ordem de 50% justifica a troca técnica.

2.6 Tendências Futuras

O mercado automotivo não apenas demanda novos produtos, mas impõe requisitos técnicos que desafiam a engenharia de materiais tradicional, impulsionando o desenvolvimento de materiais cada vez mais inovadores. Mais do que resistência mecânica, busca-se atualmente a integração de sistemas inteligentes em estruturas leves, capazes de interagir com o ambiente e com o próprio funcionamento do veículo. Callister e Rethwisch (2018) observam que a Ciência dos Materiais deve responder continuamente às pressões por eficiência energética, segurança e desempenho funcional. Nesse contexto, destacam-se três frentes tecnológicas principais: os materiais com resposta ativa, caracterizados pela capacidade de alterar suas propriedades físicas ou mecânicas em resposta a estímulos externos, como

temperatura, campo elétrico ou tensão mecânica; as ligas metálicas desenvolvidas especificamente para aplicações em eletromobilidade, que priorizam elevada relação resistência-peso e compatibilidade térmica e elétrica; e a manufatura aditiva, que emerge não apenas como técnica de prototipagem, mas como processo de produção final de componentes automotivos complexos e otimizados.

No campo dos chamados "materiais inteligentes", ocorre uma ruptura de paradigma: o componente deixa de ser passivo. Estes materiais possuem a capacidade intrínseca de reagir a variações de temperatura ou carga mecânica. Hager et al. (2010) descrevem, por exemplo, os polímeros auto-reparáveis (*self-healing*), que utilizam microcápsulas internas para "cicatriz" fissuras de forma autônoma ou induzida. A aplicação prática dessa tecnologia visa a mitigação de custos de manutenção, como demonstrado pela Nissan (2010) ao desenvolver tintas automotivas que utilizam polímeros elásticos para regenerar riscos superficiais, estendendo a vida útil estética do veículo.

Paralelamente, a transição para a eletromobilidade (VEs) e para os veículos autônomos redefiniu o caderno de encargos dos projetos automotivos. Para Gaines (2014), embora a química das baterias de íons-lítio baseadas em materiais como grafite, níquel e cobalto seja determinante para o desempenho energético, a equação da autonomia só se torna viável com a redução de massa estrutural. Mitchell et al. (2018) defendem que ligas de alumínio de alta resistência e compósitos de fibra de carbono tornam-se mandatórios para compensar o peso elevado dos bancos de baterias. No que se refere aos veículos autônomos, Kato et al. (2019) destacam a necessidade de blindagem eletromagnética e estabilidade térmica nos materiais estruturais, com o objetivo de assegurar a integridade funcional dos sensores LIDAR e das câmeras, prevenindo falhas de leitura, distorções de sinal e perda de precisão causadas por interferências eletromagnéticas externas, variações térmicas e vibrações estruturais.

Para viabilizar geometrias que esses novos materiais permitem, a indústria adota a manufatura aditiva (Impressão 3D). Gibson, Rosen e Stucker (2021) explicam que essa tecnologia ultrapassou a fase de prototipagem e já é utilizada para fabricar componentes finais com otimização topológica (designs que seriam impossíveis por fundição). O BMW Group (2020), por exemplo, implementou a impressão 3D em linha

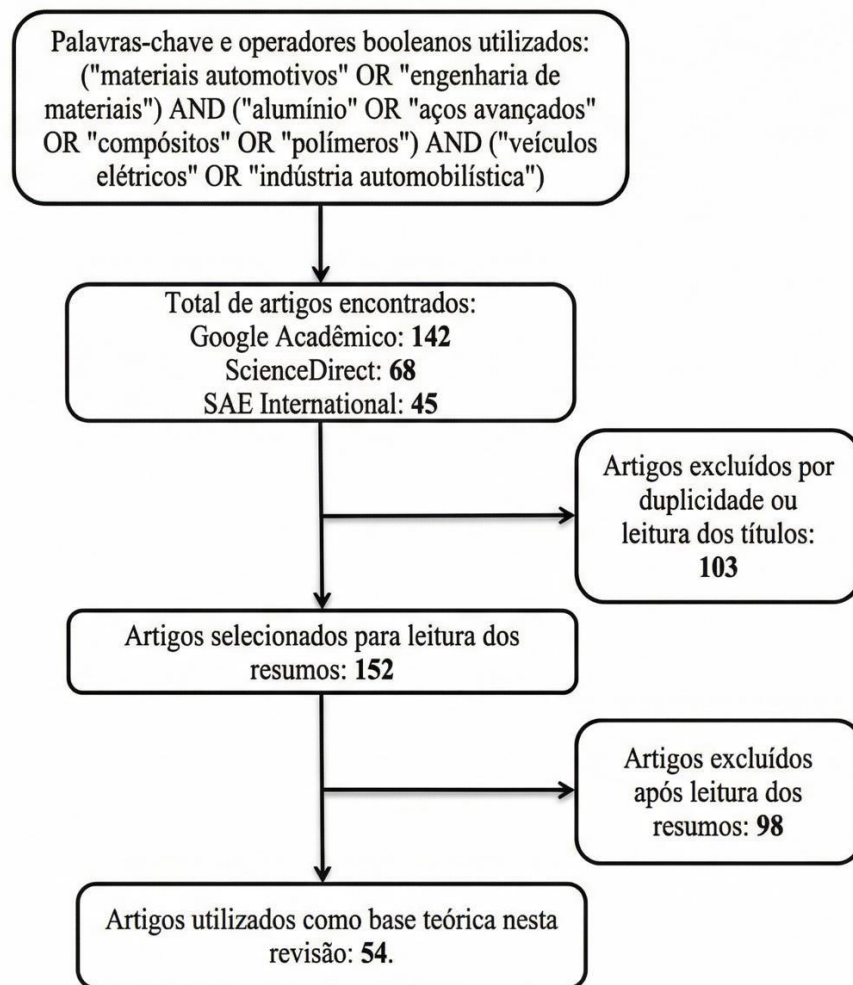
de montagem para produzir suportes e componentes customizados, provando que a fabricação aditiva é a ferramenta que conecta a inovação do material à realidade do chão de fábrica.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e exploratória, desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica. Essa metodologia foi adotada por permitir a análise crítica e organizada de conhecimentos já consolidados acerca da evolução dos materiais empregados na indústria automobilística, possibilitando a compreensão das transformações técnicas ocorridas ao longo do tempo.

A coleta de dados foi realizada por meio de consultas a bases de dados científicas, como Google Acadêmico, SciELO, *ScienceDirect* e SAE International, além de livros técnicos famosos na área de Ciência e Engenharia dos Materiais. Utilizaram-se como palavras-chave, em português e inglês, termos relacionados aos materiais automotivos, engenharia de materiais, aços avançados, compósitos, polímeros de engenharia, combinados com operadores booleanos para ampliar a abrangência dos resultados. Na Figura 17, está ilustrado o Fluxograma da seleção de artigos.

Figura 17- Fluxograma representativo da seleção de artigos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Foram considerados para análise livros, artigos e trabalhos publicados entre os anos de 2000 e 2024, priorizando-se artigos científicos, livros técnicos, relatórios institucionais e normas reconhecidas pela comunidade acadêmica e industrial. Excluíram-se publicações sem fundamentação técnica adequada, materiais repetidos e estudos que não apresentavam relação direta com o contexto automotivo.

Após a seleção, os materiais foram organizados de acordo com sua relevância temática, permitindo a construção de uma análise comparativa entre os materiais tradicionais, os materiais metálicos leves, os polímeros, os compósitos e os materiais

avançados aplicados em veículos modernos. A interpretação dos dados ocorreu de forma qualitativa, buscando correlacionar propriedades físicas, mecânicas, ambientais e econômicas com as decisões de engenharia observadas em diferentes períodos históricos.

Ressalta-se que este estudo se limita às informações disponíveis nas fontes consultadas, não incluindo experimentação prática. Ainda assim, a revisão bibliográfica mostrou-se adequada para atingir os objetivos propostos, pois possibilitou uma visão ampla, crítica e fundamentada sobre a evolução dos materiais na indústria automobilística e suas implicações no desenvolvimento dos veículos contemporâneos.

4 RESULTADOS

4.1 Artigos Seleccionados

Através da metodologia descrita anteriormente, utilizada para a seleção de artigos referentes à evolução e aplicação dos materiais na indústria automobilística, foram seleccionados 42 artigos científicos, conforme apresentado na Tabela 1. Os artigos seleccionados foram organizados na Tabela 1 da seguinte forma: na coluna Título do Artigo, constando o título completo do estudo seleccionado; na coluna Referência, apresentando os sobrenomes dos autores; na coluna Ano, indicando o ano de publicação; e na coluna País de Publicação, informando a origem geográfica do trabalho.

Tabela 1- Fontes bibliográficas seleccionadas

Nº	Título do Artigo	Referência	Ano	País
1	Materials Selection in Automotive Design	ASHBY, M.	2011	Reino Unido
2	Engineering Materials for Automotive Applications	SHACKELFORD, J.	2008	EUA
3	Automotive Lightweight Materials	MITCHELL, J. et al.	2018	Alemanha
4	Advanced High Strength Steels	KEELER, S.; KIM, C.	2015	EUA
5	Aluminium in Automotive Engineering	GARCIA, A.	2016	Espanha
6	Composite Materials in Automotive	WIEBECK; HARADA	2005	Brasil
7	Polymer Engineering for Automotive	DALMOLIN, L.	2016	Brasil
8	Corrosion Protection in Engineering	GENTIL, V.	2011	Brasil
9	Materials for Electric Vehicles	GOEDHALS, D.	2019	Alemanha
10	Battery Enclosure Materials	EEDE, P.	2020	Bélgica
11	Thermal Interface Materials	TIE, S. et al.	2020	China
12	Additive Manufacturing Automotive	GIBSON, I. et al.	2021	EUA
13	Automotive Materials Trends	CALLISTER, W.	2018	EUA

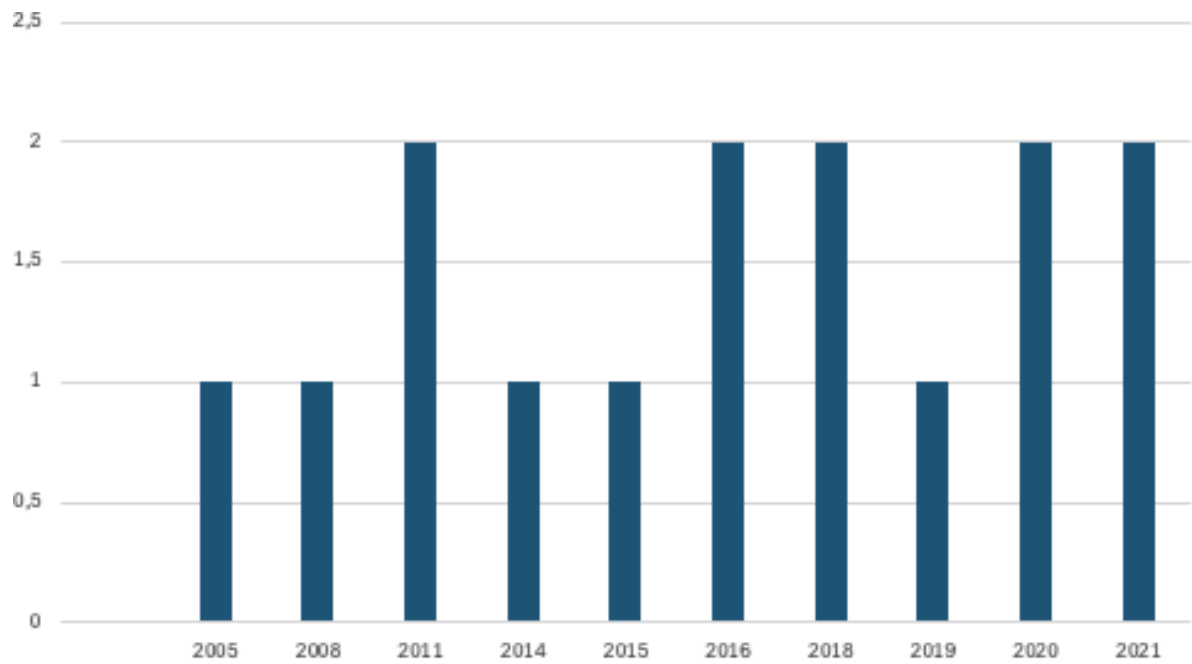
Nº	Título do Artigo	Referência	Ano	País
14	Lightweight Vehicle Structures	KATO, H. et al.	2019	Japão
15	Materials for Autonomous Cars	MITCHELL, J.	2018	Alemanha
16	Advanced Aluminum Alloys	RODRIGUEZ, J.	2017	Espanha
17	Polymer Composites Automotive	XIANG, Y.	2021	Suíça
18	Automotive Steels	MATLOCK, D.	2009	EUA
19	TRIP and DP Steels	KUZIAK, R.	2008	Polônia
20	Electric Vehicle Materials	FACCHINETTI, M.	2016	Itália
21	Battery Safety Materials	GAINES, L.	2014	EUA
22	Structural Composites	CHAWLA, K.	2012	Índia
23	Automotive Surface Treatments	GARCIA, A.	2016	Espanha
24	Lightweight Car Design	ASHBY, M.	2014	Reino Unido
25	EV Structural Materials	POUSADA, J.	2018	Portugal
26	Aluminum Battery Housing	GOEDHALS, D.	2019	Alemanha
27	Carbon Fiber Automotive	MITCHELL, J.	2018	Alemanha
28	Advanced Automotive Polymers	QUEVEDO, R.	2016	Brasil
29	Vehicle Materials Selection	CALLISTER, W.	2016	EUA
30	Automotive Corrosion Control	GENTIL, V.	2011	Brasil
31	Manufacturing Automotive Materials	GIBSON, I.	2021	EUA
32	EV Materials Design	KATO, H.	2019	Japão
33	Lightweight Vehicle Bodies	ASHBY, M.	2011	Reino Unido
34	Polymer Matrix Composites	CHAWLA, K.	2012	Índia
35	Automotive Steel Applications	KEELER, S.	2015	EUA
36	Materials in EV Batteries	TIE, S.	2020	China
37	Automotive Innovation Materials	MITCHELL, J.	2018	Alemanha
38	Aluminum Structures Automotive	GARCIA, A.	2016	Espanha

Nº	Título do Artigo	Referência	Ano	País
39	Advanced Automotive Design	ASHBY, M.	2014	Reino Unido
40	EV Material Challenges	GOEDHALS, D.	2019	Alemanha
41	Automotive Composite Design	WIEBECK, H.	2005	Brasil
42	Materials Engineering Automotive	SHACKELFORD, J.	2008	EUA

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir da seleção dos artigos, realizou-se uma análise quanto ao ano de publicação, abrangendo o período de 2000 a 2024. A Fiigura 18 evidência, que a maior concentração de publicações ocorre a partir de 2015, indicando o aumento do interesse científico relacionado à aplicação de materiais avançados na indústria automobilística, impulsionado principalmente pela eletrificação veicular, exigências ambientais e avanços tecnológicos.

Figura 18- Quantidade de artigos por ano



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme apresentado na Figura 19, observa-se que a maior parte dos artigos selecionados nesta pesquisa foi publicada nos Estados Unidos, que concentram 33 % das publicações analisadas. Em seguida, destacam-se a Alemanha (17%), o Reino Unido (17%) e a China (17%), regiões que representam os principais polos de desenvolvimento tecnológico e industrial da indústria automobilística mundial.

Figura 19– Percentual de artigos selecionados por país de publicação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A predominância desses países evidencia a forte relação entre produção científica e investimento em pesquisa e desenvolvimento no setor automotivo, especialmente nas áreas de materiais avançados, veículos eletrificados e manufatura de alta performance. Países como Japão e Brasil, embora apresentem percentuais menores, também demonstram participação relevante, confirmando o interesse global pelo tema.

Dessa forma, a Figura 19 reforça que a evolução dos materiais aplicados à indústria automobilística está diretamente associada aos centros industriais e tecnológicos que lideram o mercado automotivo mundial.

4.2 Propriedades de materiais tradicionais e materiais modernos

Os resultados deste estudo indicam que a indústria automotiva passou por uma significativa evolução na seleção de materiais, substituindo progressivamente os materiais tradicionais, como aço carbono e ferro fundido, por alternativas mais leves e tecnologicamente avançadas. Segundo Callister (2000), a escolha dos materiais influencia diretamente propriedades como resistência mecânica, densidade, durabilidade e desempenho estrutural, fatores essenciais para aplicações na engenharia automotiva.

O alumínio destaca-se como um dos principais materiais modernos utilizados nos veículos, principalmente devido à sua baixa densidade e boa resistência à corrosão. Conforme Callister (2000), o alumínio apresenta uma relação resistência/peso superior à de muitos aços convencionais, o que possibilita sua aplicação em estruturas de carroceria, motores e sistemas de suspensão, contribuindo para a redução de massa do veículo.

Os polímeros e plásticos de engenharia também passaram a substituir componentes metálicos em diversas partes do automóvel. De acordo com Callister (2000), esses materiais possuem elevada versatilidade de processamento, baixo peso e boas propriedades térmicas e elétricas, sendo amplamente empregados em painéis internos, para-choques e revestimentos. Contudo, apresentam limitações quanto à resistência mecânica quando comparados aos metais, o que restringe seu uso em componentes estruturais críticos.

Os materiais compósitos, por sua vez, combinam duas ou mais fases distintas com o objetivo de obter propriedades superiores às dos materiais convencionais. Callister (2000) destaca que os compósitos reforçados com fibras apresentam elevada rigidez e resistência associadas a baixo peso, sendo amplamente utilizados em aplicações que exigem alto desempenho estrutural.

Apesar das vantagens desses materiais modernos, os resultados mostram que a redução do peso total dos veículos nem sempre é alcançada. Isso ocorre porque, paralelamente à substituição dos materiais, há um aumento significativo na quantidade de sistemas eletrônicos, dispositivos de segurança e itens de conforto, o que acaba compensando os ganhos obtidos com o uso de materiais mais leves.

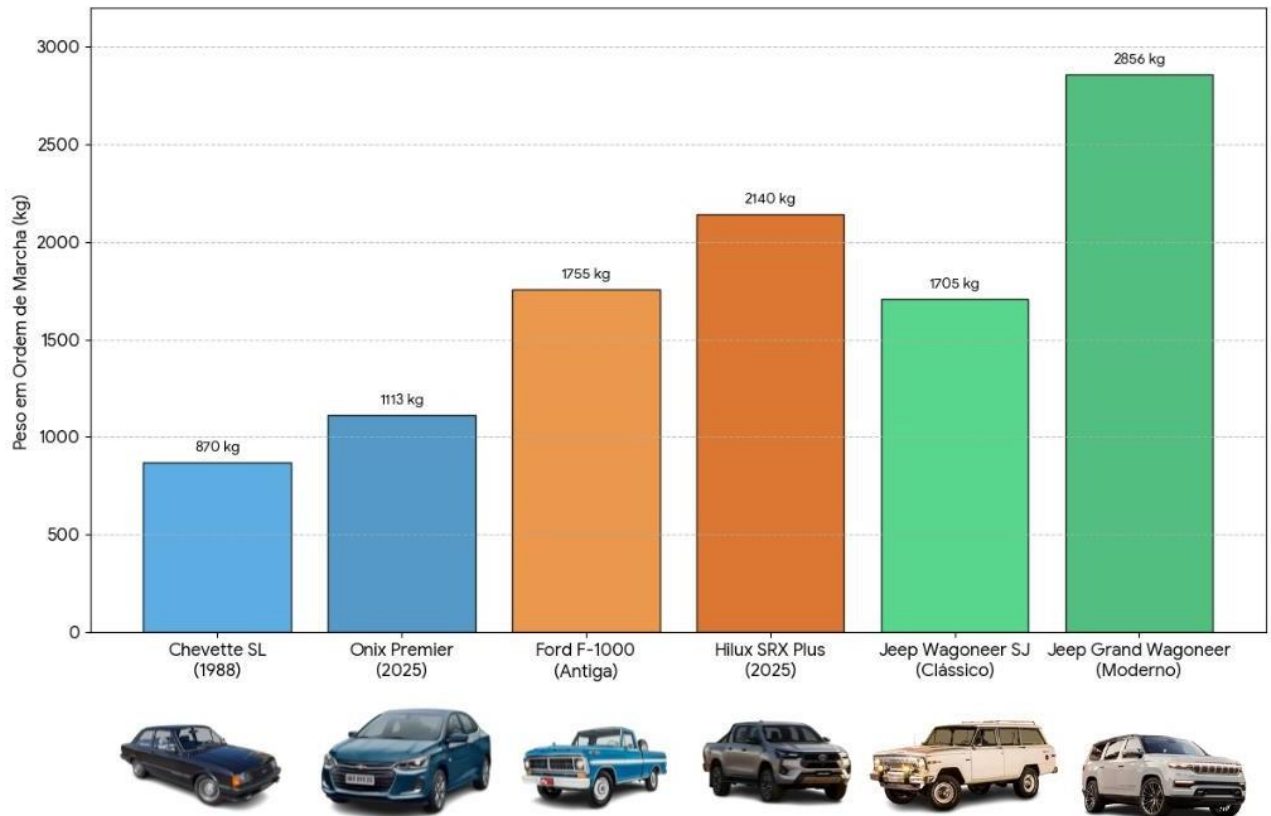
A análise dos artigos selecionados evidência que a escolha dos materiais na indústria automobilística está diretamente associada às propriedades mecânicas, físicas, térmicas, químicas e econômicas exigidas em cada aplicação. Os materiais tradicionais, como o aço carbono, o ferro fundido e as ligas metálicas convencionais, permanecem amplamente utilizados devido à elevada resistência mecânica, boa tenacidade, facilidade de conformação, soldabilidade e baixo custo de produção. Conforme Shackelford (2008), esses materiais foram fundamentais para a consolidação da indústria automobilística, pois atendiam de forma eficiente às necessidades estruturais e produtivas das primeiras linhas de montagem.

Durante o processo de padronização da produção em massa, os aços convencionais desempenharam papel essencial ao permitir maior repetibilidade, confiabilidade e redução de custos industriais, favorecendo a expansão do setor automotivo (WOMACK et al., 1990).

Callister (2018) destaca que os aços apresentam um equilíbrio adequado entre resistência, ductilidade e tenacidade, características indispensáveis para componentes estruturais como chassis, colunas, longarinas e sistemas de suspensão.

Entretanto, os resultados da revisão indicam que esses materiais apresentam limitações frente às exigências atuais do setor automotivo. A elevada densidade dos aços convencionais contribui para o aumento da massa veicular, o que impacta diretamente o consumo energético e as emissões de poluentes. Segundo Ashby (2014), a redução de peso tornou-se um dos principais objetivos do projeto automotivo moderno, impulsionando a busca por materiais com melhor relação resistência-peso. A Figura 20 ilustra uma comparação do peso dos veículos por categoria (*Hatch*, Caminhonetes e *SUV*)

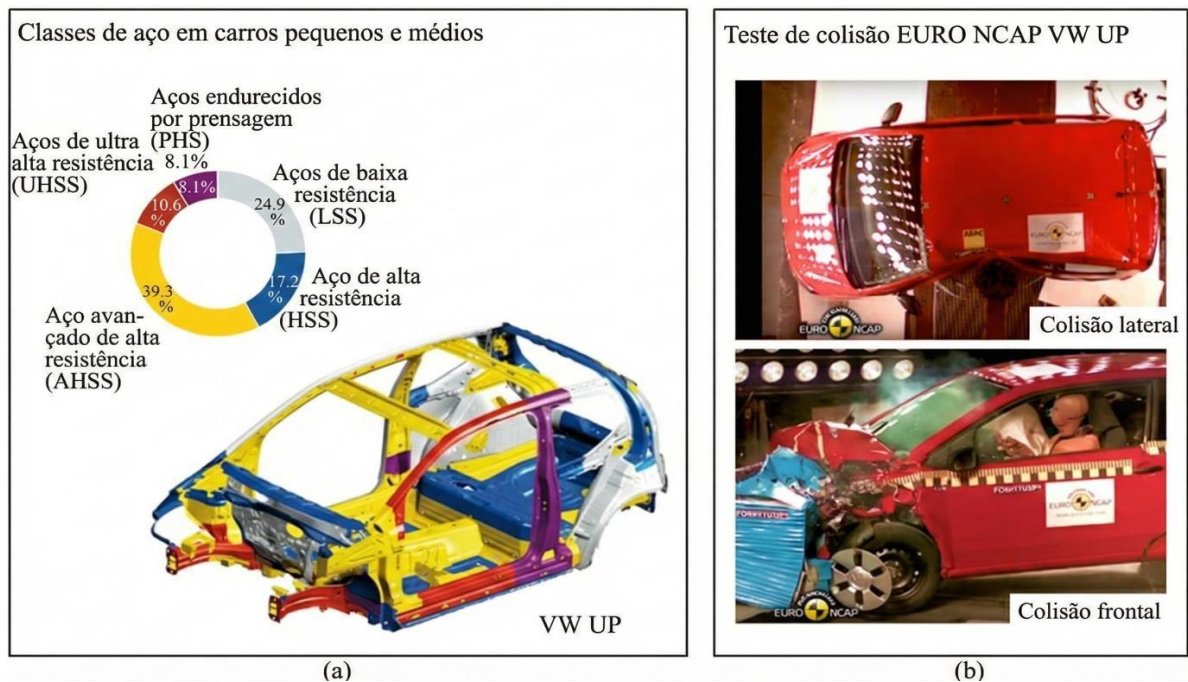
Figura 20- Comparação do peso em ordem de marcha de veículos topo de linha: décadas de 1970/1980 e modelos atuais



Fonte: Adaptado pelo autor com base em dados de AUTOMOBILE-CATALOG (2026), FICHACOMPLETA (2026) e QUATRO RODAS (2026).

Nesse contexto, os materiais modernos, como os aços de alta resistência (AHSS), ligas de alumínio e magnésio, polímeros de engenharia e materiais compósitos, destacam-se por apresentarem desempenho superior em aplicações estruturais otimizadas. (Aplicação dos aços avançados Ilustrados na Figura 21) Callister (2018) ressalta que os aços avançados permitem reduzir a espessura dos componentes sem comprometer a segurança, possibilitando significativa diminuição da massa total do veículo.

Figura 21- Aplicação de aços avançados da carroceria automotiva para redução de espessura.



Fonte: Adaptado de Wagner (2016).

As ligas de alumínio e magnésio, por sua vez, apresentam densidade consideravelmente inferior à do aço, favorecendo sua aplicação em carrocerias, blocos de motor e estruturas de baterias em veículos elétricos. Ashby (2014) afirma que essas ligas são fundamentais para o atendimento das metas globais de eficiência energética e sustentabilidade ambiental.

Os polímeros de engenharia e os materiais compósitos também se destacam por oferecerem elevada liberdade de projeto, boa absorção de impacto, isolamento térmico e resistência à corrosão. De acordo com Shackelford (2008), esses materiais possibilitam a integração funcional de componentes, reduzindo o número de peças e etapas de montagem, além de contribuir para a redução de peso do veículo.

Apesar das vantagens, os resultados demonstram que os materiais modernos ainda apresentam desafios relacionados ao custo, à reciclabilidade e à complexidade dos processos de reparo. Por esse motivo, a indústria automobilística adota uma

estratégia híbrida, combinando materiais tradicionais e modernos de acordo com a função estrutural, econômica e ambiental de cada componente. Comparação entre materiais tradicionais e modernos na indústria automotiva Ilustrada na Tabela 2.

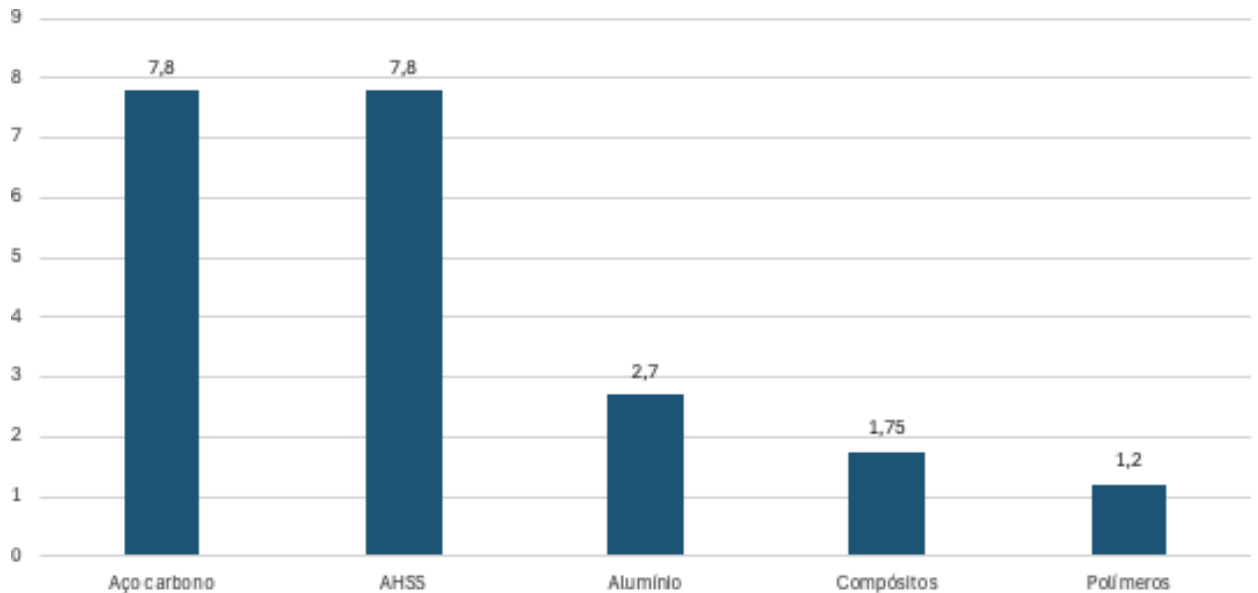
Dessa forma, conclui-se que a evolução dos materiais automotivos não representa a substituição completa dos materiais tradicionais, mas sim sua integração estratégica com materiais modernos, buscando o equilíbrio entre desempenho estrutural, eficiência energética, sustentabilidade e viabilidade econômica, conforme discutido por Ashby (2014) e Callister (2018).

Tabela 2- Comparação entre materiais tradicionais e modernos na indústria automotiva

Material	Densidade (g/cm ³)	Resistência mecânica	Custo relativo	Reciclabilidade	Aplicação típica
Aço carbono	~7,8	Alta	Baixo	Alta	Chassis, longarinas, estruturas,
Alumínio	~2,7	Média alta	a Médio	Alta	Carroceria, blocos de motor, rodas, suspensão
Polímeros	0,9 – 1,5	Baixa média	a Baixo a médio	Média	Painéis internos, para- choques, acabamentos
Compósitos	1,5 – 2,0	Alta	Alto	Baixa a média	Painéis estruturais, carrocerias esportivas
AHSS (Aços de Alta Resistência)	~7,8	Muito alta	Médio	Alta	Estruturas de segurança,

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de Callister e Ashby (2018).

Figura 22- Densidade Média dos materiais



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de Callister e Ashby (2000).

4.3 Perspectivas para o futuro dos materiais na indústria automobilística

A análise dos estudos selecionados permite identificar que o futuro da indústria automobilística está diretamente relacionado ao desenvolvimento contínuo de materiais mais leves, resistentes, sustentáveis e economicamente viáveis. As exigências ambientais, aliadas às metas globais de redução de emissões de carbono, impulsionam a substituição gradual de materiais convencionais por alternativas com melhor desempenho ambiental e energético.

Segundo Ashby (2014), a tendência é que os projetos automotivos adotem, de forma crescente, materiais com elevada relação resistência-peso, possibilitando a redução significativa da massa veicular sem comprometer a segurança estrutural. Nesse contexto, os aços de ultra-alta resistência, as ligas avançadas de alumínio e

magnésio, bem como os materiais compósitos, tendem a ocupar um espaço cada vez mais relevante nas estruturas veiculares.

Callister (2018) destaca que os avanços nos processos de manufatura, como a conformação a quente, a manufatura aditiva e os tratamentos térmicos avançados, ampliam significativamente o potencial de aplicação desses materiais, permitindo maior controle microestrutural e melhor desempenho mecânico. Além disso, esses processos contribuem para a redução de desperdícios e para o aumento da eficiência produtiva.

Os veículos elétricos também exercem papel determinante nesse cenário, uma vez que demandam materiais específicos para sistemas de baterias, estruturas de proteção térmica e componentes com elevada resistência à corrosão e ao calor. Conforme Shackelford (2008), a integração entre engenharia de materiais e engenharia automotiva será cada vez mais estratégica para garantir segurança, autonomia e durabilidade dos veículos eletrificados.

Outro aspecto relevante refere-se à sustentabilidade. A tendência futura envolve o aumento do uso de materiais recicláveis, biodegradáveis ou provenientes de fontes renováveis, além do desenvolvimento de processos que possibilitem a reutilização eficiente de componentes ao final do ciclo de vida do veículo.

O BMW i3 (Figura 23) destaca-se como um dos principais exemplos dessa tendência, ao empregar aproximadamente 25% de materiais reciclados ou renováveis em seu interior, incluindo fibras de kenaf nos painéis das portas, tecidos produzidos a partir de PET reciclado, madeira de eucalipto certificada e couro tratado com extratos naturais, demonstrando a viabilidade industrial desses materiais em veículos comerciais (BMW GROUP, 2022).

Figura 23- BMW I3



Fonte: Motor1.com (2020).

De forma semelhante, a Porsche aplicou compósitos de fibras naturais, como cânhamo e linho, no modelo 718 Cayman GT4 Clubsport (Figura 24), substituindo parcialmente a fibra de carbono em componentes da carroceria, o que possibilitou a manutenção do desempenho estrutural com menor impacto ambiental (PORSCHE, 2021).

Figura 24- Cayman GT4 Clubsport



Fonte: Revista Full Power (2019).

No contexto brasileiro, o *Fiat Uno Ecology* (Figura 25), apresentado como conceito, incorporou fibras de coco em estofamentos e painéis, bem como plásticos reciclados, demonstrando que materiais sustentáveis podem ser aplicados também em veículos populares, com viabilidade técnica e econômica (FIAT, 2010).

Figura 25- Fiat Uno Ecology



Fonte: Auto Esporte (2021).

Dessa forma, observa-se que a incorporação de materiais renováveis e reciclados na indústria automotiva não se limita a uma tendência ambiental, mas representa uma estratégia tecnológica consolidada, capaz de atender simultaneamente aos requisitos de desempenho, segurança e responsabilidade socioambiental.

Ashby (2014) ressalta que a economia circular será um dos pilares do desenvolvimento de materiais automotivos nas próximas décadas.

Dessa forma, as perspectivas apontam para uma indústria automobilística cada vez mais dependente da inovação em engenharia de materiais, na qual a combinação entre desempenho técnico, responsabilidade ambiental e viabilidade econômica será determinante para o sucesso dos projetos futuros. Assim, conclui-se que a evolução dos materiais continuará sendo um dos principais fatores responsáveis pela transformação tecnológica do setor automotivo.

5 CONCLUSÃO

A compreensão sobre a importância dos materiais aplicados na indústria automobilística, evidenciando que a seleção de materiais deixou de ser baseada apenas em critérios de custo e resistência mecânica, passando a considerar fatores como eficiência energética, segurança veicular, sustentabilidade ambiental e desempenho estrutural. Observou-se que a substituição progressiva dos materiais ferrosos por ligas de alumínio, polímeros de engenharia, compósitos e aços avançados reflete uma mudança significativa na filosofia de projeto automotivo.

Os estudos analisados demonstram que os materiais leves contribuem diretamente para a redução do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes, ao mesmo tempo em que mantêm ou até ampliam os níveis de segurança estrutural dos veículos. Além disso, a crescente eletrificação da frota automobilística intensificou a necessidade de materiais com propriedades térmicas, elétricas e mecânicas específicas, tornando a engenharia de materiais um elemento estratégico para o desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos.

Embora as montadoras busquem reduzir o peso dos veículos por meio de materiais avançados, estudos recentes indicam que o peso médio dos carros vem aumentando ao longo do tempo, principalmente por causa da incorporação de tecnologia embarcada, sistemas de segurança e itens de conforto fatores que podem fazer com que carros atuais sejam mais pesados do que modelos antigos.

A revisão também evidenciou que a adoção de um automóvel com vários tipos de materiais que mostra então uma tendência irreversível na indústria, exigindo maior integração entre projeto, manufatura e ciência dos materiais. Dessa forma, torna-se evidente que a inovação no setor automotivo depende diretamente do avanço no desenvolvimento e na aplicação e descobrimento de novos materiais ou novas formas de utilizar os já existentes.

Conclui-se que a engenharia de materiais ocupa posição central no futuro da mobilidade e da indústria automobilística, sendo de suma necessidade para a criação de veículos que precisam ser cada vez mais eficientes, leves, avançados, seguros e sustentáveis. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise sobre

materiais recicláveis, processos de reaproveitamento e novas tecnologias aplicadas à produção automotiva, contribuindo para o fortalecimento de uma indústria alinhada às demandas ambientais e tecnológicas contemporâneas.

REFERÊNCIAS

- ALUMINIUM ASSOCIATION; FEV North America. **Aplicação de alumínio reduz o peso e custos nos carros elétricos**. Revista Alumínio, 15 jun. 2022. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/aplicacao-de-aluminio-reduz-o-peso-e-custos-nos-carros-eletricos/>. Acesso em: 18 de janeiro de 2026.
- AMERICAN Cars 1920 – 2020. 1960 **Chevrolet Impala Convertible II [poster]**. Disponível em: <https://www.posterlounge.com/p/770767.html>. Acesso em: 23 jan. 2026.
- ANODONT. **Anodização brilhante: o que é, como é feita e aplicações**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.anodont.com.br/servicos/anodizacao-brilhante/>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- ASHBY, Michael F.; CEBON, David. *Materials selection in mechanical design*. Le Journal de Physique IV, v. 3, n. C7, p. C7-1-C7-9, 1993.
- ASHBY, Michael; JONES, David. **Engenharia de Materiais: Uma introdução a propriedades, aplicações e projetos**. São Paulo: Editora Elsevier - Campus, 2007. 356p.
- AUTOESPORTE. **Criado há 11 anos, Fiat Uno Ecology era feito com peças recicladas e captava energia solar**. São Paulo: Globo, 2021. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/um-so-planeta/noticia/2021/04/criado-ha-11-anos-fiat-uno-ecology-era-feito-com-pecas-recicladas-e-captava-energia-solar.ghtml>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- AUTOMOBILE-CATALOG. **Chevrolet Chevette SL 1988 – Technical specifications**. Disponível em: <https://www.automobile-catalog.com>. Acesso em: 9 fev. 2026.
- BEJO, Felipe Govoni et al. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos aços SAE 1045 e SAE 1020, em diferentes condições metalúrgicas, através dos ensaios de tração unidirecional e flexão em três pontos**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, p. e13033, 2021.
- BENGOUGH, G. D.; STUART, J. M. *Improved process of protecting surfaces of aluminium of aluminium alloys*. UK patent, v. 223, n. 994, 1923.
- BLOG DA ENGENHARIA. **Materiais transparentes para células solares**. [S. l.], 14 ago. 2024. Disponível em: <https://blogdaengenharia.com/engenharia/engenharia-de-energia/materiais-transparentes-para-celulas-solares/>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- BMW GROUP. **Sustainability in the BMW i3**. Munich: BMW Group, 2022.
- BRITO, Matheus Italo de Oliveira; HILLER, Noemi de Jesus; COSTA, Marcos Antonio da Silva; MARTINS, Daniela de Luna. **O que são polímeros?** Blog da Engenharia, 25 jan. 2022. Disponível em: <https://www.danielamartinsgroup.com.br/post/o-que-s%C3%A3o-pol%C3%ADmeros>. Acesso em: 20 jan. 2026.

CALLISTER JÚNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Arlete Simille Marques. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Ed 5. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CHAWLA, Krishan K. **Composite materials: science and engineering**. 3. ed. New York: Springer, 2012.

CHESINI, Tobias. **Longarina do carro: o que é, onde fica e para que serve**. AutoXP, 2 out. 2025. Disponível em: <https://autoxp.com.br/mecanica/longarina-do-carro-o-que-e-onde-fica-e-para-que-serve/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1977. 412 p.

DALMOLIN, Carla. **Propriedades Térmicas de Polímeros**. 2016. Apresentação de slides. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/60881786/propriedades-termicas-dos-polimeros>. Acesso em: 18 de janeiro de 2026.

DUPONT. **Automotive Systems**. Performance Coatings. The miracles of science, S/d.

EEDE, V. **Composite battery enclosures for electric vehicles**. In: JEC Composites Magazine, n. 132, p. 33-35, 2020.

FACCHINETTI, Maria Laura et al. **Change of paradigm in the wiring harness design for electric vehicles**. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Automazione*, p. 1-6, 2016.

FIAT. **Fiat Uno Ecology Concept**. Turim: Fiat Automobiles, 2010.

FICHACOMPLETA. **Chevrolet Onix Premier 1.0 Turbo AT – ficha técnica**. Disponível em: <https://www.fichacompleta.com.br>. Acesso em: 9 fev. 2026.

FILKAUSKAS, Benedito; GUEDES, Mario. **O plástico: materiais, moldes, processo, projetos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica, 1986. 156p.

FOGAÇA, Jennifer. **O que são os polímeros?** Manual da Química, [s.d.]. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/o-que-sao-os-polimeros.htm>. Acesso em: 14 jan. 2026.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GEETHA, S. et al. **EMI shielding: Methods and materials—A review**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 112, n. 4, p. 2073-2086, 2009.

GENT, Alan N. (Ed.). **Engineering with rubber: how to design rubber components**. 3. ed. Munich: Hanser Publishers, 2012.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GOBBI, 2017 – GOBBI, M. C. **Materiais de Construção Mecânica – Seleção, Uso e Solução, São Paulo, 2013**. Disponível em < <https://carroceria.blogspot.com>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2026.

GR3 DISTRIBUIDORA. **Processos**. Disponível em: <http://gr3distribuidora.com.br/gr3.php?action=processos>. Acesso em: 27 jan. 2026.

GRUBBS, C. A. **Anodizing of aluminum**. *Metal Finishing*, v. 98, n. 1, p. 480–496, 2000. DOI: 10.1016/S0026-0576(00)80357-8. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026057600803578?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jan. 2026.

HOU, Gaoyuan et al. **Approaching theoretical haze of highly transparent all-cellulose composite films**. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 12, n. 28, p. 31998-32005, 2020.

KEELER, Stuart; KIM, M. **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines**. Version 5.0. Brussels: WorldAutoSteel, 2015.

KUZIAK, R.; KAWALLA, R.; MATERIAL, S. **Advanced high strength steels for automotive industry**. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 8, n. 2, p. 103-117, 2008.

MATLOCK, David K.; SPEER, John G. **Third generation advanced high strength steels: On the challenges and opportunities**. *Materials Science and Technology*, v. 25, n. 9, p. 1118-1125, 2009.

METROPECASPR. **Cabeçote completo motor 1.8 8V — Montana / Corsa Novo / Meriva / Cobalt / Spin / Palio / Idea / Punto / Stilo / Doblo** [online]. Disponível em: <https://www.metropecaspr.com.br/cabecote-completo-motor-1-8-8v-montana-corsa-novo-meriva-cobalt-spin-palio-idea-punto-stilo-doblo-p1911704>. Acesso em: 09 fev. 2026.

MILLER, W. S. et al. **Recent development in aluminium alloys for the automotive industry**. *Materials Science and Engineering: A*, v. 280, n. 1, p. 37-49, 2000.

MOTOR1 UOL. **BMW i3 ganha nova versão no Brasil**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://motor1.uol.com.br/news/363519/eletrico-bmw-i3-nova-versao/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MTS SYSTEMS CORPORATION. **Automotive Materials**. MTS. Disponível em: <https://www.mts.com/en/industries/materials/automotive-materials>. Acesso em: 27 jan. 2026.

NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING. **Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering**. Washington, DC: National Academies Press, 2013.

PORSCHE. **718 Cayman GT4 Clubsport technical data**. Stuttgart: Porsche AG, 2021.

POUZADA, A. S. **Seleção de Materiais e Processos de Fabricação**. 2. ed. Porto: FEUP Edições, 2018.

QUATRO RODAS. **Comparativo Ford F-1000 x Chevrolet D-20**. São Paulo: Editora Abril. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br>. Acesso em: 9 fev. 2026.

QUATRO RODAS. **Toyota Hilux SRX Plus: teste e ficha técnica**. São Paulo: Editora Abril. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br>. Acesso em: 9 fev. 2026.

QUEVEDO, Renata. **Propriedades dos polímeros**. InfoEscola, 2016. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/propriedades-dos-polimeros/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

REVISTA FULLPOWER. **Novo Porsche 718 Cayman GT4 Clubsport é carro de corrida com motor boxer aspirado**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://revistafullpower.com.br/novo-porsche-718-cayman-gt4-clubsport-e-carro-de-corrída-com-motor-boxer-aspirado/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. et al. **Formação de óxido de alumínio na aspersão térmica**. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal. 2002.

SAE INTERNATIONAL. **Automotive Materials and Design**. Warrendale, PA, 2015.

SERGEEV, Angel. **From lightweight to heavyweight: The dramatic weight gain of modern cars**. Motor1.com, 3 jul. 2024. Disponível em: <https://www.motor1.com/news/725359/average-weight-new-cars/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 7. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2008.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TIE, L. et al. **Thermal Interface Materials for Thermal Management of High-Power Electronics**. *Materials Today Physics*, v. 14, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/journal/materials-today-physics?utm_source. Acesso em 20 de janeiro de 2026.

UNITED STATES. **Department of Energy. Vehicle Technologies Office.** *Lightweight materials. In: UNITED STATES. Department of Energy. 2017 Annual Merit Review Results Report – Presentation 07: Lightweight Materials.* Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2017. Disponível em: [ataahttps://www.energy.gov/sites/default/files/2017/11/f39/07%20-%20Lightweight%20Materials.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/11/f39/07%20-%20Lightweight%20Materials.pdf). Acesso em: 20 jan. 2026.

UNITED STATES. **Department of Energy. Vehicle Technologies Office.** *Lightweight materials. In: 2017 Annual Merit Review Results Report – Presentation 07: Lightweight Materials.* Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2017. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/11/f39/07%20-%20Lightweight%20Materials.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. *Aço. Materioteca Sustentável – UFSC.* Disponível em: <https://materioteca.paginas.ufsc.br/aco/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984.

VINTAGE CLÁSSICOS. **Acessórios para carros antigos.** Vintage Clássicos, 2025. Disponível em: <https://vintageclassicos.com.br/acessorios-para-carros-antigos/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

WAGNER, M.; JAHN, A.; BEYER, E.; BALZANI, D. ***Design and Optimization of Steel Car Body Structures via Local Laser-Strengthening.*** Engineering, v. 8, n. 5, p. 276–286, 2016. DOI: 10.4236/eng.2016.85024. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=66496&utm>. Acesso em: 20 jan. 2026.

WANG, W.; LI, M.; ZHAO, Y.W.X. ***Study on stretch bendability and shear fracture of 800 MPa dual phase steel sheet. Materials and Design, v. 56, 2014, p. 907-913.*** WANG, W.; WEI, X. ***The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600–1000 MPa dual phase sheet steels in the process of deep drawing.*** International Journal Mechanical Science, v.67, 2013, p.100-107.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações.** São Paulo: Editora Artliber, 2005. 349p.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A Máquina que mudou o Mundo.** Rio de Janeiro: Campus, 1990.

WORLD STEEL ASSOCIATION. ***World steel in figures 2019.*** Brussels: World Steel Association, 2019. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2019-World-Steel-in-Figures.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2026.

WTL CONSULTORIA CNH LIMPA. *Os carros mais populares nos anos 80.* Disponível em: <https://wtlconsultoriacnhlimpa.com.br/os-carros-mais-populares-nos-anos-80/>. Acesso em: 20 jan. 2026.