

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Seleção de materiais poliméricos para blindagem de baterias de carros
elétricos**

JOÃO OTÁVIO GOMES DE OLIVEIRA PRADO

Seleção de materiais poliméricos para blindagem de baterias de carros elétricos

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: **Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa**

**São Carlos - SP
2023**



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: João Otavio Gomes de Oliveira Prado

RA: 589519

TÍTULO: Seleção de materiais poliméricos para blindagem de baterias de carros elétricos

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 25/08/2023, 17h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa	9,0	10,0
Prof. Dr. Juliano Marini	9,0	10,0
Média	9,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

Prof. Dr. Juliano Marini

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Carla, meu espelho.

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar às mulheres da minha vida, minha mãe, avós e namorada, sem elas não teria chegado até aqui.

Ao meu orientador, por toda paciência, apoio, atenção e compreensão ao longo de todo o processo.

Aos meus amigos e sócios de longa data, que sempre me deram forças. E trabalhar ao lado deles foi uma grande motivação para continuar a batalha.

Aos meus irmãos, por me demandarem atenção em horas erradas, mas sempre serem motivo do meu sorriso.

“The most difficult thing is the decision to act, the rest is merely tenacity. The fears are paper tigers. You can do anything you decide to do. You can act to change and control your life, and the procedure, the process, is its own reward.”

Amelia Earhart

RESUMO

Veículos elétricos (VE) são uma realidade cada vez mais próxima, dado as movimentações em *background* pelas grandes montadoras a fim de cumprir novas legislações ambientais e aumentar a eficiência da mobilidade. Ao pensar em um VE, dois componentes são os principais objetos de estudo de aprimoramento: o motor elétrico e as baterias. Os principais desafios do setor são entregar segurança e confiabilidade em uma nova tecnologia. Um destes é prover soluções para blindagem eletromagnética das baterias Li-ion. Para tal, um invólucro é utilizado para proteger estas baterias e, comumente, são manufaturadas com ligas metálicas. Estas, por sua vez, propensas a carregamentos mecânicos, altas forças de impacto (colisão), descontrole térmico (incêndio) e interferências eletromagnéticas. Por demanda do próprio mercado, busca-se eficiência com baixo peso, enaltecendo propriedades específicas. Assim, materiais poliméricos sobrepuseram-se como possíveis candidatos para tal aplicação. Neste sentido, o objeto de estudo desse trabalho foi trazer a discussão sobre a possibilidade de substituição das ligas metálicas usuais por materiais de matrizes poliméricas, aproveitando a baixa densidade do material. Dessa maneira, aplicou-se a metodologia convencional de Ashby visando maximizar condutividade elétrica e tenacidade e diminuir densidade e o preço. Como resultado, foi obtido uma classe de candidatos, majoritariamente a base de matrizes termoplásticas com reforços de fibras de carbono. Estas demonstraram-se aptas para serem utilizadas para tal aplicação. No entanto, uma análise crítica quanto a sua exploração comercial torna-se necessária. Aqui, além de discutir esta questão, também analisou o panorama atual da indústria de desenvolvimento de materiais poliméricos para blindagem eletromagnética de baterias de carros elétricos.

Palavras-chave: Baterias. Blindagem. Veículos. Elétricos. Polímeros. Matriz

ABSTRACT

Electric vehicles (EVs) are an increasingly imminent reality, given the behind-the-scenes efforts by major automakers to comply with new environmental regulations and enhance mobility efficiency. When considering an EV, two components are the primary subjects of study for improvement: the electric motor and the batteries. The main challenges in the sector are to provide safety and reliability in a new technology. One of these challenges is to provide solutions for electromagnetic shielding of Li-ion batteries. To achieve this, an enclosure is used to protect these batteries, and commonly, they are manufactured using metallic alloys. These covers are susceptible to mechanical loads, high impact forces (collisions), thermal instability (fires), and electromagnetic interference. Due to market demand, efficiency with low weight is sought, highlighting specific properties. In this context, polymeric materials have emerged as potential candidates for such applications. The focus of this study was to discuss the possibility of replacing conventional metallic alloys with polymer matrix materials, leveraging the low material density. Thus, the conventional Ashby methodology was applied to maximize electrical conductivity and toughness while reducing density and cost. As a result, a class of candidates was identified, mainly based on thermoplastic matrices reinforced with carbon fibers. These materials proved suitable for use in this application. However, a critical analysis of their commercial feasibility is necessary. In addition to discussing this issue, the current landscape of the polymer material development industry for electromagnetic shielding of electric car batteries was also analyzed.

Keywords: Batteries. Electromagnetic Shielding. Vehicles. Electric. Polymeric. Matrix

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação Interface-Definição-Composição de materiais de VEs.....	17
Tabela 2 - Tipos de materiais utilizados no invólucro considerando a montadora e modelo do veículo [2].	19
Tabela 3 - Normas SAE que regulam diferentes aspectos do design do invólucro das baterias [4].....	20
Tabela 4 - Modelamento do projeto de seleção de materiais	32
Tabela 5 - Relação dos Índices de Méritos (IM) relacionados nos gráficos de Ashby	34
Tabela 6 – Ranqueamento dos candidatos após aplicação do índice de mérito mostrando os materiais candidatos selecionados (*FR = Flame Retardant) (fonte: autor).....	34
Tabela 7 - Variedade de materiais CPC's com desempenho de EMI Shielding [13]	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo simplificado de representação de um veículo elétrico [4]	15
Figura 2 - Componentes de uma bateria de EV [5]	18
Figura 3 - Modelo simplificado de injetora de termoplásticos de rosca recíproca [8]	22
Figura 4 – Desenho esquemático sobre o funcionamento do EMI Shielding [13] ...	26
Figura 5 - Comparação ponderando a condutividade entre polímeros e outros materiais. a) Resistência elétrica do compósito metal-plástico vs com a resistência de metais e polímeros. b) Resistência térmica (alfa) dos compósitos metal-plásticos vs outros materiais (adaptado de [14])	27
Figura 6 - Estratégia da metodologia de Ashby para seleção de materiais	30
Figura 7 - Gráficos de ASHBY após aplicação de filtros e índice de mérito: (a) densidade versus resistividade elétrica e (b) tenacidade versus preço (fonte: autor)	33

LISTA DE SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

CPC – Conductive Polymer Composite

EM – Electromagnetic

EMI – Electromagnetic Interference

EV - Electric Vehicle

FR – Flame Retardant

HV-Bus – High Voltage Bus

ICP – Intrinsic Conductive Polymers

IEC – International Electrotechnical Commission

ISO - International Organization for Standardization

MWCNT – Multi-walled Carbon Nanotubes

OEM – Original Equipment Manufacturer

SAE – Society of Automobile Engineers

SoC – State of Charge

SoH – State of Health

UN – United Nations

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
2	Objetivos.....	15
3	Revisão da Literatura.....	15
3.1	Baterias.....	16
3.2	Baterias de VEs	17
3.3	O invólucro das baterias	18
3.4	Moldagem por injeção.....	21
3.5	Propriedades de interesse	22
3.6	EMI Shielding.....	23
3.6.1	Efetividade de blindagem (SE)	24
3.6.2	Atuação dos mecanismos de blindagem	24
3.6.3	Permissividade elétrica e Permeabilidade magnética.....	27
3.7	Materiais poliméricos com capacidade de condução intrínseca (ICP)	28
3.8	Materiais Compósitos ou composto de polímero condutor (CPC)	28
3.9	Metodologia de seleção de materiais.....	29
3.9.1	A metodologia de Ashby	29
4	Metodologia	31
5	Resultados e Discussões	32
6	Considerações Finais e Tendências Futuras.....	37
7	Referências	39

1 Introdução

A indústria automobilística faz parte da história moderna humana e mudou o conceito de mobilidade, além de se apresentar como a força motriz na construção de conhecimento em diferentes áreas de estudo. A inovação, persistente neste setor, ganhou um novo capítulo com a eletrificação, resultado da alta eficiência energética necessária nos dias atuais e de pressões legislativas ambientais associadas às emissões poluentes de combustíveis fósseis.

Veículos elétricos (VE) são caracterizados por dois componentes principais, a motorização elétrica e um conjunto de baterias que alimentam o sistema de transmissão com um potencial, gerando movimento. A ideia de propulsão elétrica é antiga e remonta a metade do século XIX [1].

A rápida eletrificação do setor automobilístico trouxe consigo a necessidade de inovação em um setor já bastante consolidado. A atualização veio marcada pela exploração de novos materiais, composições, normas e legislações. Componente central de um VE, a bateria requer variadas condições para seu funcionamento ideal, que envolvem a manutenção térmica, sua integridade frente ao carregamento mecânico natural do veículo e proteção contra interferências eletromagnéticas.

A exploração de baterias baseadas em *Lithium-Ion* (Li-Ion) propiciou significativo aumento na densidade de carga armazenada, resultando em diminuição do volume ocupado pelo componente, além de ter maior durabilidade.

Junto com a evolução da tecnologia utilizada na bateria, veio a necessidade de um melhor empacotamento das células de carga (baterias). De forma que atenda a requisitos mínimos de desempenho e segurança. O invólucro, como é denominado usualmente, é a porção que recobre o pacote completo das células de carga. Esta peça tem a função de proteger as baterias de fontes de perturbação mecânica e eletromagnética, além de conter possíveis reações químicas indesejáveis que possam culminar em incêndios.

Assim, os materiais que envolvem pacote de baterias precisam atender aos requisitos recomendados da aplicação. A regulação desse item está atrelada a diversas normas de órgãos regulares da indústria automobilística, como por exemplo as normas da *Society of Automobile Engineers* (SAE).

Atualmente a grande maioria dos VEs tem suas baterias revestidas com um invólucro de ligas de alumínio, devido as suas propriedades intrínsecas que permitam uma boa blindagem eletromagnética (*Electromagnetic Interference Shielding - EMI Shielding*): alta capacidade de reflexividade ou absorção das ondas eletromagnéticas. Por exemplo, os carros da linha Model X da Tesla™ utilizam invólucros de ligas de alumínio [2].

Contudo, há uma tendência das montadoras na substituição dessa classe de material para polímeros, pois esses materiais têm uma boa relação custo x propriedade x densidade. Sendo a massa um ponto de grande importância, dado que qualquer redução tem reflexo no alcance e na autonomia do veículo. Nota-se que materiais poliméricos em seu estado puro usualmente não demonstram o comportamento elétrico e magnético propício para ser utilizado como blindagem eletromagnética (comportando *EMI Shielding*), dessa maneira, o desenvolvimento de materiais multicomponentes de matrizes poliméricas tornaram-se protagonistas[3].

Neste contexto, o ponto de interesse deste trabalho é explorar materiais poliméricos como potencial aplicação à manufatura de invólucros de bateria de veículos elétricos, principalmente compósitos de matrizes termoplásticas. O estudo do potencial uso dos materiais poliméricos para tal aplicação será sustentado pela aplicação da metodologia convencional de Ashby para seleção de materiais.

2 Objetivos

Objetiva-se realizar o método convencional de Ashby para prospectar possíveis candidatos poliméricos para blindagem eletromagnética de baterias de veículos elétricos, visando selecionar um material de baixa densidade, alto *EMI Shielding* e com propriedades mecânicas que atendam a aplicação, principalmente tenacidade à fratura.

3 Revisão da Literatura

Um carro elétrico possui diversos componentes em sua construção, contudo os que se destacam são os motores elétricos e as baterias. O modelo simplificado de representação de um veículo elétrico está presente na **Figura 1**. Para tal, é necessário conhecer as funções e operação dos componentes, a fim de relacionar com as propriedades que serão posteriormente tratadas.

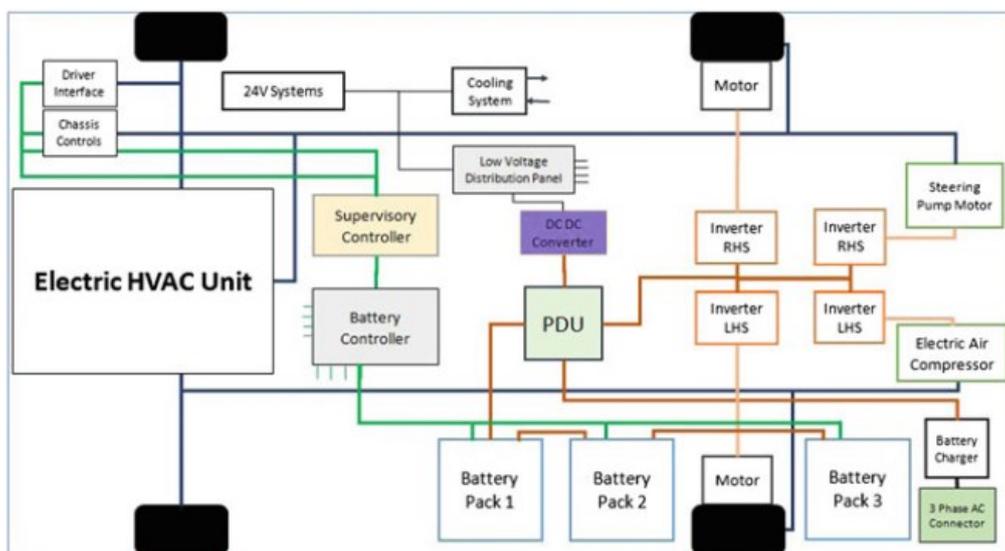


Figura 1 - Modelo simplificado de representação de um veículo elétrico [4]

O *design* do empacotamento das baterias é uma questão complexa e tem seu desenho limitado por uma série de normas. Essas regras são importantes pois definem padrões a serem seguidos pelos fabricantes e formas de atestar confiabilidade. A SAE é a principal entidade que regula normativas no segmento automotivo.

3.1 Baterias

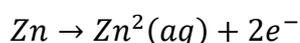
Baterias são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica e podem consistir em um ou mais células eletrolíticas. Estas estão interconectadas a fim de prover tensão e capacidade adequada [5].

Uma bateria é comumente composta por:

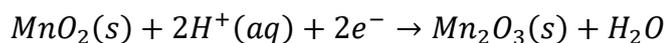
- a. Ânodo: o eletrodo negativo da bateria. É tipicamente feito de um metal reativo como zinco e lítio. Estes, por sua vez, perderão elétrons em uma reação de oxidação;
- b. Cátodo: o eletrodo positivo da bateria. É tipicamente feito de material que sofrerá redução, ou seja, um receptor de elétrons durante a reação química. Por exemplo, dióxido de manganês ou óxido de lítio-cobalto.
- c. Eletrólito: é uma substância, líquida ou sólida, que permite o fluxo de corrente (de partículas carregadas) entre o ânodo e o cátodo. Podendo ser uma solução ácida ou alcalina.

Quando a bateria está conectada em um circuito, uma reação eletroquímica acontece. Essa reação pode ser interpretada e dividida em duas reações parciais:

1. Oxidação: no ânodo, um metal reativo (ex. zinco) é oxidado e perde elétrons para o meio, produzindo íons e liberando energia.



2. Redução: no cátodo, um material catódico (ex. dióxido de manganês) é reduzido e ganha elétrons, consumindo os íons metálicos e a energia liberada.



Esse fluxo de elétrons gera uma corrente elétrica no circuito externo, que pode ser utilizada, por exemplo, para alimentar dispositivos ou recarregar outras baterias.

É importante observar que as baterias têm uma capacidade limitada e se esgotam à medida que os reagentes são consumidos ou quando a reação química alcança um equilíbrio. Baterias recarregáveis conseguem “rebobinar” esse ciclo, à medida que uma corrente elétrica externa é aplicada, restaurando os reagentes, de forma que a bateria pode ser reutilizada. Contudo, mesmo baterias recarregáveis têm vida útil definida, e têm sua percepção interpretada em ciclos de recarga, ou seja, a capacidade de máxima de renovar os reagentes químicos [6].

3.2 Baterias de VEs

As baterias utilizadas em veículos elétricos (VEs) se diferenciam muito das baterias de uso comum, como em controles remotos ou mesmo em carros à combustão. Os pontos de maior diferenciação são: tamanho e capacidade, densidade de energia, materiais de cátodo e ânodo, capacidade de ciclos, sistemas integrados de segurança e custo.

As baterias de VEs se comunicam com diferentes subsistemas, conforme expressado na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Relação Interface-Definição-Composição de baterias de VEs

Interface	Definição	Formado por
Mecânica	Chassis e contenção mecânica	Espaçadores de células, amortecedores, juntas, válvulas
Estrutural	Barras de proteção e isolamento estrutural	Case, cover, placas de travamento, barras de direção, barras de travamento
Térmico	Regula a temperatura da bateria	Líquido refrigerante, ventiladores, bombas, trocadores de calor
Elétrico	Transmite energia da, e para, a bateria	Linhas de tráfego de energia, cabos, contatos elétricos, fusíveis, relays
Controle	Monitora e regula o estado da bateria	Controlador de tensão da bateria, sensoreamento
Suporte	Peças adjacentes do corpo do veículo adicionando resistência à colisão	Eixos, chassis, assentos, assoalho do veículo

As interfaces entre os componentes implicam que uma variedade de estruturas atuará para manter a integridade das baterias, sendo cada parte atuando com uma propriedade compartilhada.

A **Figura 2** abaixo esquematiza as partes de uma bateria convencional para VEs. Estas são formadas usualmente por: **(i)** placa inferior; **(ii)** placa de resfriamento **(iii)** proteções de impacto laterais, **(iv)** pacote das baterias e **(v)** cofre da bateria, também chamado de invólucro. Nota-se que, o objeto de estudo deste presente

trabalho é a seleção de materiais poliméricos para aplicação como invólucro de baterias de veículos elétricos.

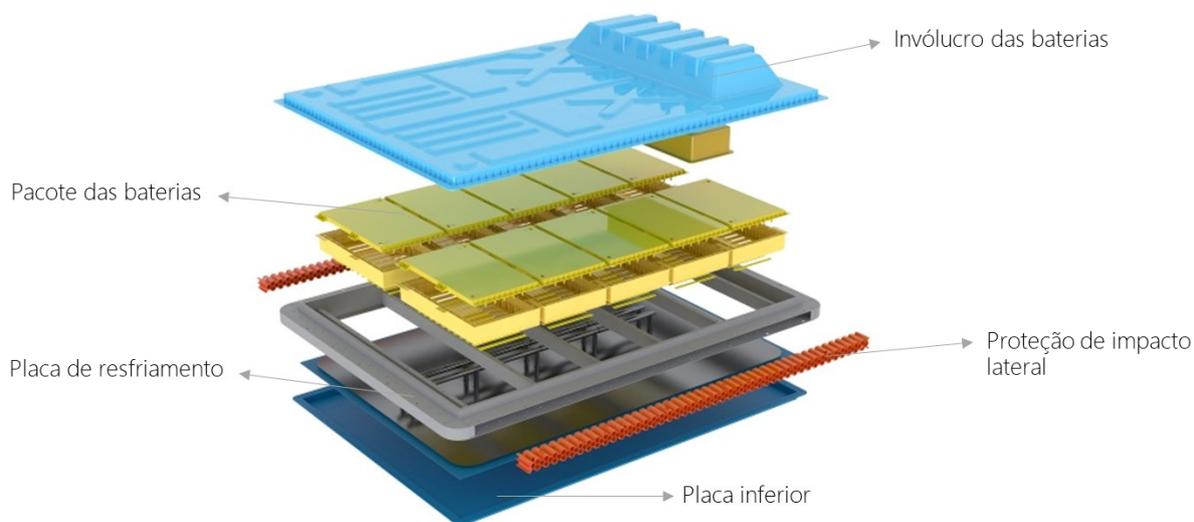


Figura 2 - Componentes de uma bateria de EV [5]

3.3 O invólucro das baterias

A utilização destes invólucros baseia-se na seguinte problemática: a energia necessária para movimentar um carro elétrico é muito mais alta do que a necessária para os atuais carros. A tensão elétrica é aproximadamente 900V, conduzida por uma rede apropriada de cabeamento (HV-Bus), advinda das baterias. Cada componente interligado nesse sistema, alimentado com alta tensão, será uma grande fonte de campo eletromagnético, com frequência na faixa de 2-150 KHz. Estes componentes também estarão desprotegidos das ondas eletromagnéticas externas (predominantes nas faixas de 6-12 GHz), que podem afetar negativamente em seu funcionamento, dado alta sensibilidade dos componentes e sensores.

Comercialmente os principais invólucros utilizados são ligas de alumínio ou aço. Por exemplo, os veículos elétricos Model Y[®] da Tesla[™] utilizam uma composição de liga de aço no invólucro superior e alumínio no inferior. Algumas relações entre montadora/modelo de veículos elétricos e os principais materiais utilizados como invólucros estão apresentadas na **Tabela 2**. No entanto, o panorama atual da indústria de veículos elétricos está indicando que, cada vez mais, as OEM (*Original Equipment Manufacturer*) estão explorando mais profundamente novos potenciais materiais com diferentes composições a fim de melhorar a construção do pacote das baterias.

Analisando a **Tabela 2**, cabe salientar que dentre os materiais utilizados como invólucros de baterias de carros elétricos, os metais se destacam. Apenas uma única aplicação polimérica foi encontrada, mas de composição desconhecida.

Tabela 2 - Tipos de materiais utilizados no invólucro considerando a montadora e modelo do veículo [2].

Montadora/Modelo	Material
Tesla Roadster	Alumínio
Tesla Model Y	Alumínio/Aço
Honda Fit EV	Aço
Chevrolet Volt	Aço
Chevrolet Spark EV	Compósito (Matriz: Resina Termofixa Vinil-éster / Reforço: Fibra Não identificada)
BMW i3	Alumínio

Na construção desse componente é considerada uma série de normas, estas regulam várias propriedades que o invólucro precisa possuir para ter um bom desempenho, de forma a manter o “coração” do veículo elétrico (as baterias) funcionando de forma confiável e segura. Além disso, espera-se que os invólucros mantenham índices de *performance* como SOC (*State Of Charge* – definida pela razão entre a capacidade disponível e a possibilidade máxima de carga (Q(t)) que pode ser armazenada na bateria, também conhecida como capacidade nominal Q_n), SOH (*State Of Health* – é um indicador que define a capacidade de bateria remanescente comparado a capacidade no início de vida da bateria, ou seja, define o envelhecimento da bateria) e eficiência energética [4], [7].

De forma a estabelecer uma série de guias, especificações e critérios que irão definir como as propriedades supracitadas devem ser projetadas, manufaturadas, testadas e operadas, foram criadas normas por diversos órgãos. Por se tratar de um componente que remete ao setor automobilístico, a SAE, tem papel principal na regulamentação. Há também outras entidades, como a ISO, IEC e UN que também estabelecem regulações sobre veículos elétricos e seus componentes. As principais normas SAE que regulamentam diferentes aspectos do *design* do invólucro de baterias estão presenta na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Normas SAE que regulam diferentes aspectos do design do invólucro das baterias [4]

Norma	Título	Escopo
SAE J240	<i>Life test for automotive storage batteries</i>	Teste de vida útil simula o descarregamento e carregamento das baterias, representando o sistema de ciclos.
SAE J1766	<i>Recommended practice for EV and hybrid vehicle battery systems crash integrity testing</i>	Especifica métodos de teste e critérios de desempenho que avaliam derramamento, retenção e isolamento elétrico da bateria durante testes de colisão especificados
SAE J1797	<i>Packaging of electric vehicle battery modules</i>	Fornece projetos de bateria comuns por meio da descrição de dimensões, terminação, retenção, sistema de ventilação e outros recursos necessários em uma aplicação em VE
SAE J1798	<i>Recommended practice for performance rating of electric vehicle battery modules</i>	Métodos comuns de teste e verificação para determinar o desempenho do módulo de bateria do EV. O documento descreve os padrões de desempenho e especificações.
SAE J2185	<i>Life test for heavy-duty storage batteries</i>	Simula aplicações pesadas, submetendo a bateria a ciclos de descarga e carga mais profundos do que os encontrados ao dar partida em um veículo.
SAE J2289	<i>Electric-drive battery pack system: functional guidelines</i>	Descreve práticas para o projeto de sistemas de bateria para veículos que utilizam uma bateria recarregável para fornecer ou recuperar energia de tração
SAE J2344	<i>Technical guidelines for electric vehicle safety</i>	Define informações de diretrizes de segurança que devem ser consideradas ao projetar veículos elétricos para uso em vias públicas.
SAE J2380	<i>Vibration testing of electric Vehicle batteries</i>	Descreve o teste de durabilidade por vibração de um módulo de bateria ou conjunto de bateria de veículo elétrico.
SAE J2464	<i>Electric vehicle battery abuse testing</i>	Descreve um conjunto de testes para o teste de abuso de baterias de veículos elétricos.
SAE J2929	<i>Electric and hybrid vehicle propulsion battery system safety standard</i>	Critérios de desempenho de segurança para um sistema de bateria considerado para uso em uma aplicação de propulsão de veículo como um sistema de armazenamento de energia galvanicamente conectado a um trem de força de alta tensão.
SAE J1113/41	<i>Limits and Methods of Measurements of Radio Disturbance Characteristics of Components and Modules.</i>	Dita os métodos de medir interferências eletromagnéticas

Durante o desenvolvimento do veículo elétrico da geração atual, foram escolhidos componentes que se dispuseram como os disponíveis e hábeis para devida aplicação. Ou seja, padronizou-se a utilização de aço e alumínio como material base para o invólucro. Materiais metálicos, em geral, já possuem as características e comportamento que as OEM estavam procurando [3].

Contudo, com o avanço da eletrificação no setor automobilístico, as OEM's têm procurado alternativas que possam cumprir as propriedades gerais requeridas, mostrando propriedades superiores às soluções metálicas atualmente. No geral, compósitos de matriz polimérica têm se mostrando possíveis candidatos para tal aplicação, pois contam com grande ponto a favor, a boa relação *propriedade x densidade*, ou seja, a propriedade específica. Dessa forma, as representantes líderes no mercado de plástico de engenharia desenvolveram soluções adequadas para este segmento para que pudessem concorrer diretamente com as opções metálicas já adotadas no mercado.

Os materiais poliméricos hábeis para aplicação nos invólucros de baterias, em geral, são materiais multicomponentes de matriz polimérica. Isto será melhor discutido posteriormente neste trabalho. Comumente o *design* final do invólucro, de geometria complexa, é alcançado por moldagem por injeção quando a matriz é termoplástica.

3.4 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção consiste em um processo cíclico, forçando o material plastificado sob pressão para dentro de uma cavidade. A forma final é alcançada após resfriamento (em termoplásticos) ou por reação de cura (elastômeros e termofixos). A moldagem por injeção é considerado um dos métodos de processamento mais versáteis, podendo obter produtos finais de variados formatos, tamanhos e dimensões [8]. Este método é considerado um dos mais utilizados para manufatura de invólucros de baterias de VEs.

Aproximadamente 32% em peso das peças de todos os termoplásticos processados são obtidas através da moldagem por injeção. Contudo, há um alto custo envolvido nesse método produtivo, dada a construção robusta das máquinas que irão exercer várias toneladas de pressão sobre o material polimérico, e dos moldes por sua alta complexidade visto a variedade de cavidades, acabamento superficial manufaturados em material metálico de alto desempenho. Assim, balancear a variável custo é um desafio, sendo o tempo de ciclo o gargalo do sistema, e geralmente, o

resfriamento da peça, para que a peça atinja rigidez suficiente para ser ejetada, é a etapa mais demorada do processo. Na **Figura 3** há um modelo simplificado de uma máquina de injeção.

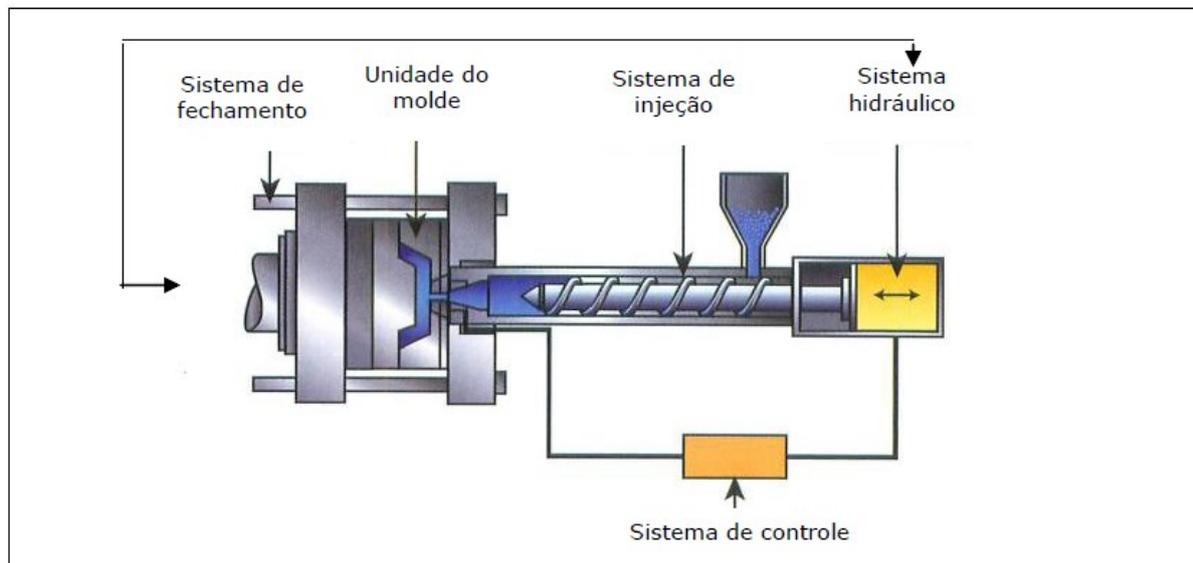


Figura 3 - Modelo simplificado de injetora de termoplásticos de rosca recíproca [8]

Assume-se que os invólucros de baterias de VE's são materiais multicomponentes de matriz polimérica, pois materiais poliméricos puros não possuem naturalmente as propriedades requisitadas para este tipo de aplicação. Assim, é notável que tenha uma etapa de mistura anterior da injeção, sendo essa normalmente realizada em uma extrusora dupla-rosca co-rotacional [9].

3.5 Propriedades de interesse

A aplicação como invólucros de baterias (baseadas em Li-ion) depende de uma série de restrições definidas pelas normas já apresentadas. Mas de forma resumida, algumas propriedades de interesse se destacam, conforme apresentadas a seguir:

1. Resistência mecânica e tenacidade: o invólucro deve possuir suficiente integridade estrutural e mecânica para superar variados tipos de carregamentos e estresses durante a operação do veículo, isto inclui forças de impacto, vibrações, e condições de direção potencialmente severas. O invólucro deve ser capaz de enfrentar significativas carregamentos de impacto de quaisquer direções, de forma a manter as baterias e outros componentes contidos sem danos em caso de colisões.

2. Resistência química: o invólucro deve ter uma boa resistência química aos compostos presentes nas baterias, de forma a prevenir degradação, corrosão ou mesmo vazamentos que possam comprometer a segurança do veículo e passageiros.
3. Controle térmico: o invólucro deve ajudar a manter um bom controle térmico do sistema de baterias, dissipando o calor gerado durante operação e carregamento, além de oferecer capacidade de isolamento térmico para que a bateria opere em condições ótimas de *performance* e longevidade.
4. Proteção às intempéries ambientais: o invólucro deve proteger contra umidade, poeira, entrada de água e quaisquer outras condições provindas do ambiente.
5. Isolamento elétrico: o invólucro, quando isolante elétrico, é o melhor cenário possível, pois previne contra possíveis curtos-circuitos e protege os passageiros contra choques elétricos.
6. Blindagem eletromagnética (*EMI Shielding*): o invólucro deve possuir efetiva proteção contra interferências eletromagnéticas, de forma a minimizar as emissões vindas internamente do sistema de baterias e externamente do ambiente. Este é um importante comportamento para manter os “picos” de energia essenciais para o bom funcionamento do veículo [10]. Este comportamento é um dos focos principais na seleção de materiais deste presente trabalho.
7. Selamento: o invólucro precisa ter um bom selamento, impedindo que subprodutos das reações químicas que ocorrem nas células das baterias escapem e causem danos ao veículo, passageiros e ambientais.
8. Leveza: o invólucro, quando apresentado baixa densidade, é um cenário ideal para aumentar eficiência energética.
9. Manufatura eficiente: o invólucro deve ter facilidade e agilidade para ser processado, otimizar custo efetivo de produção, mantendo a qualidade e covalência com normas regulatórias.

A seguir serão abordados, individualmente, a propriedade de blindagem eletromagnética, sendo a referência mais importante para este estudo.

3.6 EMI Shielding

Interferência eletromagnética (*Electromagnetic Interference* - EMI) provinda das baterias e motores de veículos elétricos podem afetar a segurança do veículo e

dos passageiros, além de comprometer o bom funcionamento de outras partes do veículo, como sistemas de navegação, controladores de tensão e outros sistemas elétricos. Essa interferência cruzada pode comprometer o funcionamento dos componentes envolvidos. Guo *et al.* descreveram com maiores detalhes a forma como essas interferências ocorrem, considerando os dois componentes principais de um carro elétrico, o motor elétrico e as baterias [11].

Para atestar a capacidade de barreira eletromagnética de um material, normas definem a efetividade de blindagem (*shielding effectiveness* (SE)), conforme descrito na ASTM D4935-18 [12].

3.6.1 Efetividade de blindagem (SE)

A medição da efetividade do efeito de blindagem eletromagnética de um material advém da análise de atenuação desse sinal, sendo esta, por sua vez, oriunda de forma comparativa. Baseia-se na razão entre a ‘força’ do campo incidente e a ‘força’ do campo transmitido, podendo ser expressa pelas **equações 1-3** [13].

$$SE_p = 10 \log \frac{(P_{in})}{(P_{out})} \quad (1)$$

$$SE_e = 10 \log \frac{(E_{in})}{(E_{out})} \quad (2)$$

$$SE_h = 10 \log \frac{(H_{in})}{(H_{out})} \quad (3)$$

Em meio que, P, E e H são as forças da onda plana, do campo elétrico e do campo magnético, respectivamente. Os índices *in* e *out* se referem a força do campo incidente e transmitido no material, respectivamente. A efetividade, *shielding effectiveness* (SE), é expressa em decibéis (dB) [13].

3.6.2 Atuação dos mecanismos de blindagem

O total de efetividade de blindagem eletromagnética (SE) é resultado da atuação de até três mecanismos: absorção, reflexão, e a multi-reflexão interna, conforme ilustradas na **Figura 4**. Quando uma onda eletromagnética (EM) vem de encontro com a superfície do material de blindagem, onde a impedância intrínseca é diferente da impedância do meio de propagação da onda eletromagnética atuante, a onda é refletida e transmitida para dentro do material. Assim, a força das ondas refletidas e transmitidas irão depender da impedância do meio e do material. A força

de atuação das ondas transmitidas para dentro do material serão atenuadas exponencialmente conforme se propagam internamente. A distância em que a força da onda se iguala a $1/e$ (onde e é o número de Euler) é conhecida como *skin depth* (δ) → “casca”. Uma parte das ondas pode ser retransmitida quando atinge a superfície oposta do material (ocorrendo fenômeno de multi-reflexão interna) [13].

A “casca” de um material com boa condutividade elétrica (ou seja, quando $\sigma \gg 2\pi\omega\epsilon_0$) pode ser expressa via **equação 4**.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\omega\mu\sigma}} \quad (4)$$

Em que ω é a frequência, μ a permissividade magnética do material de blindagem, σ é a condutividade elétrica do material de blindagem e ϵ_0 é a permissividade do espaço vazio ($8,854 \times 10^{-12}$). Assim, levando a **equação 4** em consideração, a profundidade da casca será inversamente proporcional à condutividade elétrica, permeabilidade magnética e a frequência. Essa relação implica que quando aumentamos essas variáveis, haverá um aumento na capacidade de reflexão das ondas e diminuição da absorção [13].

Pode-se dizer então que o total de efetividade de blindagem de um material (SE_T) é dado pela combinação da efetividade de reflexão (SE_R), absorção (SE_A), e de multi-reflexões internas (SE_M), expressa pela **equação 5**.

$$SE_T = SE_A + SE_R + SE_M \quad (5)$$

Fenômenos de absorção são os de maior interesse, pois se a onda é absorvida pelo material e não somente refletida, ela fica retida e não causa mais poluição eletromagnética. Para que um material tenha boa capacidade de absorção é necessário que satisfaça dois critérios, (i) impedância excelente e (ii) um bom balanço entre fator de dissipação dielétrica e magnética.

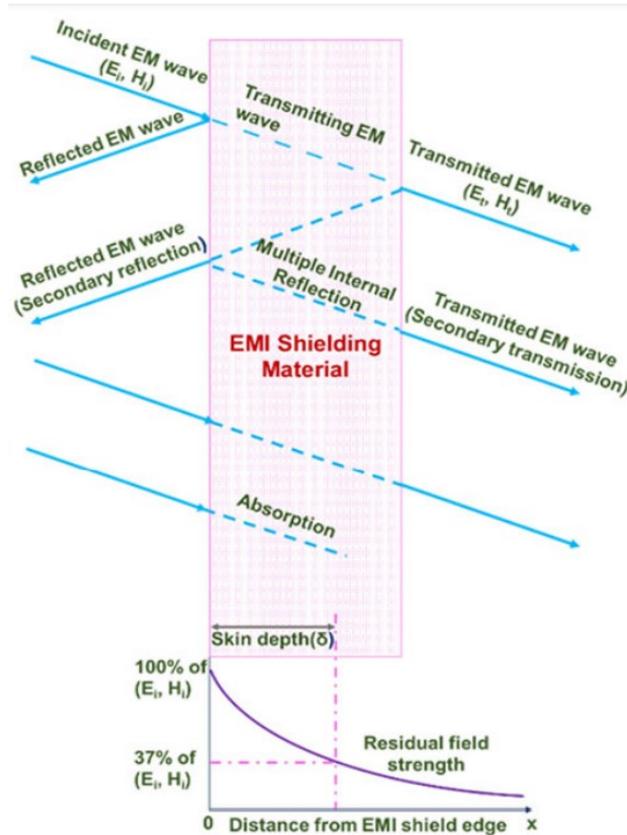


Figura 4 – Desenho esquemático sobre o funcionamento do EMI Shielding [13]

Contudo, essa característica de alta reflexão acaba por limitar a aplicação dos metais quando é necessário o fenômeno de absorção, onde é necessário efeitos furtivos ou quando há proximidade com outros equipamentos eletrônicos. Além disso, os materiais metálicos têm alta densidade e podem apresentar fácil corrosão, além de terem um alto custo associado de processamento, o que os tornam uma escolha pouco viável para algumas aplicações avançadas de blindagem eletromagnética [12].

Uma comparação de condutividade elétrica entre polímeros e diversos materiais está presente na **Figura 5**.

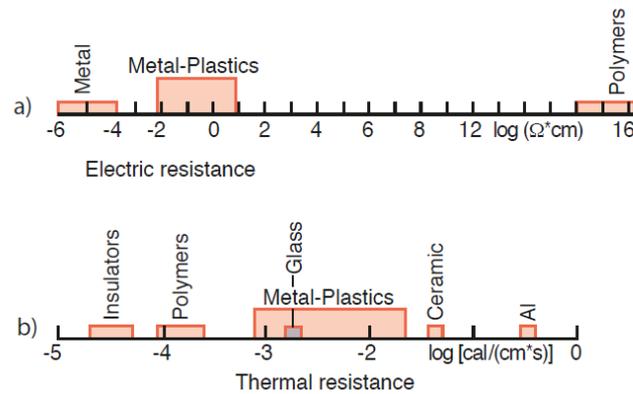


Figura 5 - Comparação ponderando a condutividade entre polímeros e outros materiais. a) Resistência elétrica do compósito metal-plástico vs com a resistência de metais e polímeros. b) Resistência térmica (alfa) dos compósitos metal-plásticos vs outros materiais (adaptado de [14])

3.6.3 Permissividade elétrica e Permeabilidade magnética

A permissividade elétrica complexa relativa e permeabilidade magnética complexa relativa são as propriedades que regem o comportamento de blindagem eletromagnética. E podem ser descritas pelas **equações 5-6**.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (5)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (6)$$

Em meio que as partes reais, ε_r' e μ_r' , indicam capacidade de carga e magnética, respectivamente de ondas eletromagnéticas; e as partes imaginárias representam a o fator de dissipação dielétrica e fator de dissipação magnética.

Polímeros são em geral materiais isolantes, isto é, não são bons condutores de corrente elétrica. Ou seja, a maior parte dos polímeros são considerados tipicamente isolantes.

Em relação ao comportamento magnético, polímeros puros são considerados diamagnéticos, ou seja, campos magnéticos externos podem induzir momentos magnéticos. Contudo, momentos magnéticos permanentes, tais quais são induzidos em materiais ferromagnéticos ou paramagnéticos, são incomuns em materiais poliméricos [14]. A capacidade de magnetização está relacionada com a intensidade de um campo magnético e a suscetibilidade magnética do material.

3.7 Materiais poliméricos com capacidade de condução intrínseca (ICP)

Materiais poliméricos no estado puro usualmente tem suscetibilidade magnética muito pequena ou mesmo negativa, ou seja, naturalmente não são bons candidatos para blindagem eletromagnética.

Contudo, há algumas exceções como os polímeros com capacidade de condução intrínseca (ICP). Esses materiais possuem um deslocamento de ligações π em uma estrutura conjugada, por exemplo, o poliacetileno (Pan), polianilina (PANI), polipirrol (PPy), e etc. O deslocamento intensivo das ligações π acaba por afetar negativamente as propriedades mecânicas. Para obtenção de melhores propriedades e de se aproveitar das características intrínsecas desses polímeros, estes são associados a outros materiais, como nanopartículas de metal, nanotubos de carbono e etc, formando uma segunda fase que irá incrementar tanto as propriedades mecânicas quanto a efetividade de blindagem eletromagnética [13].

Desta maneira, os principais candidatos à esta aplicação devem ser, necessariamente, materiais multicomponentes, principalmente compósitos poliméricos.

3.8 Materiais Compósitos ou composto de polímero condutor (CPC)

Compósitos são materiais resultado da combinação de dois os mais materiais quimicamente diferentes com uma distinta interface entre estes. Os materiais constituintes mantêm suas identidades separadas no compósito, no entanto, suas combinações produzem propriedades e características que são diferentes de seus constituintes isolados [15].

Assim, polímeros não-condutores, mas reforçados com cargas condutoras, são conhecidos como compostos de polímeros condutores (CPC). Estes são excelentes candidatos para aplicações de blindagem eletromagnéticas pois conseguem associar as boas características de polímeros de engenharia com presença de cargas condutoras. Em suma, apresentam boas propriedades elétricas, dielétricas e magnéticas, além da menor densidade.

Vale ressaltar que a forma como esses materiais se estrutura, ou seja, sua microestrutura, também contribui para o aumento da absorção de ondas eletromagnéticas. A compatibilização das cargas condutivas e a percolação

favorecida por estas também impacta diretamente no comportamento de blindagem eletromagnética.

De forma prática, as cargas condutoras adicionadas à matriz polimérica basicamente funcionarão como pequenos capacitores, pois irão aumentar a propensão de reter potencial dielétrico. Para isso, as cargas deverão formar uma rede dentro da matriz polimérica, essa rede pode ser explicada pela teoria do limite de percolação elétrico, que basicamente está associada à concentração crítica de cargas condutivas na matriz polimérica, suficiente para tornar material isolante em condutivo [13].

A formação da estrutura em rede é um desafio do processamento, pois somente o correto processo de dispersão e distribuição das cargas irá promover a percolação necessária para alcançar uma boa efetividade de barreira. Assim, como já explicitado, é necessário que o material passe por um processo prévio de mistura que garanta que o caminho elétrico seja formado para uma boa condutividade.

3.9 Metodologia de seleção de materiais

Métodos de seleção de materiais tem um papel crucial no processo de *design* e engenharia de um produto. Variados métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos. Um dos métodos mais convencionais utilizam como ferramenta os índices de *performance* (ou índice de mérito ou índice material), no qual envolve em criar um índice pela combinação das propriedades dos materiais. Contudo, apesar dessa abordagem prover uma medida quantitativa para seleção dos materiais, ela fica retida sob a *expertise* do projetista [16].

Visualmente o índice de mérito pode ser aplicado por meio da metodologia de Ashby. Esta se desdobra por prover uma abordagem sistêmica e visual da seleção de materiais. Por se utilizar de gráficos e índices de mérito, o projetista pode avaliar as relações entre variadas propriedades dos materiais, o que acaba por facilitar a comparação e identificação dos candidatos que se encaixam em parâmetros específicos.

3.9.1 A metodologia de Ashby

A metodologia Ashby foi desenvolvida por W. Ashby e é uma abordagem sistemática de engenharia amplamente utilizada e muitas vezes associada a outros

métodos de decisão multi-objetivos. Esta metodologia oferece uma ‘fórmula’ estruturada para seleção de materiais, permitindo que os engenheiros tomem decisões informadas com base nas propriedades e restrições desejadas em aplicações específicas. A metodologia envolve várias etapas principais: tradução, triagem, classificação e documentação. Aproveitando os gráficos de propriedades de materiais e considerando fatores como custo, disponibilidade e capacidade de fabricação, a metodologia Ashby ajuda a otimizar a seleção de materiais. Sua natureza sistemática e visual aprimora os processos de tomada de decisão, permitindo a identificação de materiais que se alinham com o desempenho desejado e os requisitos funcionais de uma aplicação [17]. As etapas referentes ao processo de seleção de Ashby estão ilustradas na **Figura 6**.

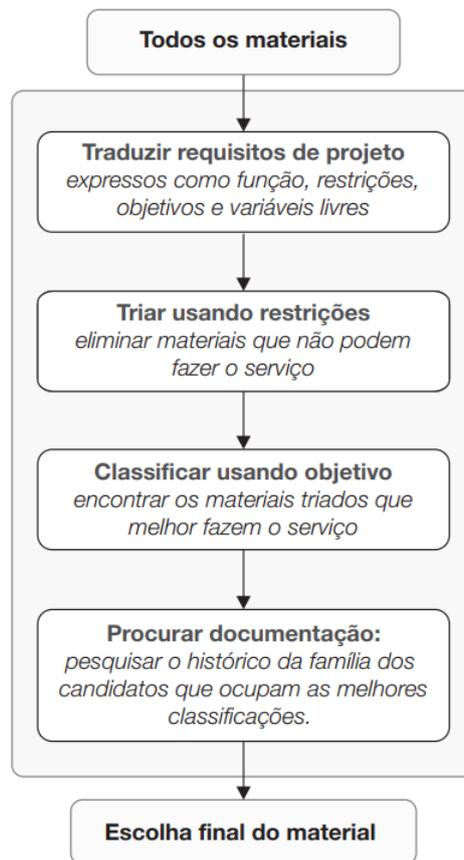


Figura 6 - Estratégia da metodologia de Ashby para seleção de materiais

1. **Tradução:** envolve traduzir os requisitos do projeto de um componente em uma ‘prescrição’ para um material. Assim, deve levar em consideração as restrições e objetivos. Alguns parâmetros podem ser ajustados para otimizar o

objetivo, essa arbitrariedade é contemplada pelas variáveis livres do processo de seleção [17].

2. **Triagem:** consiste em eliminar candidatos que não podem realizar o serviço na aplicação requerida, pois um ou mais de seus atributos está fora dos limites estabelecidos pelas restrições [17].
3. **Classificação:** no geral, é o 'ranqueamento' dos candidatos. Para isso, é necessário critérios de otimização, que são encontrados a partir dos índices de mérito. Com isso, há uma indicação de quão bem cada candidato se desempenha, considerando a etapa de triagem para determinada aplicação. Os índices de mérito irão ajudar a priorizar quais propriedades serão maximizadas e minimizadas no critério da aplicação [17]. Em linhas gerais, os índices de mérito são critérios de otimização, que irão medir quão bem um material se encaixa na aplicação. Estes serão montados a partir das relações entre as propriedades requeridas, em função dos carregamentos exercidos na peça de interesse.
4. **Documentação:** com o ranqueamento pelos índices de mérito da etapa anterior é gerado uma lista curta e ordenada com os candidatos. Na documentação são levadas em consideração uma *classificação de crédito* de cada material. Sendo uma etapa mais descritiva, em meio que são levados em consideração estudos de caso sobre a aplicação, informações sobre fadiga e falha, dados de fornecedores, cadeia de suprimentos e manuais. Reduzindo a lista curta da etapa anterior até um candidato ideal [17].

4 Metodologia

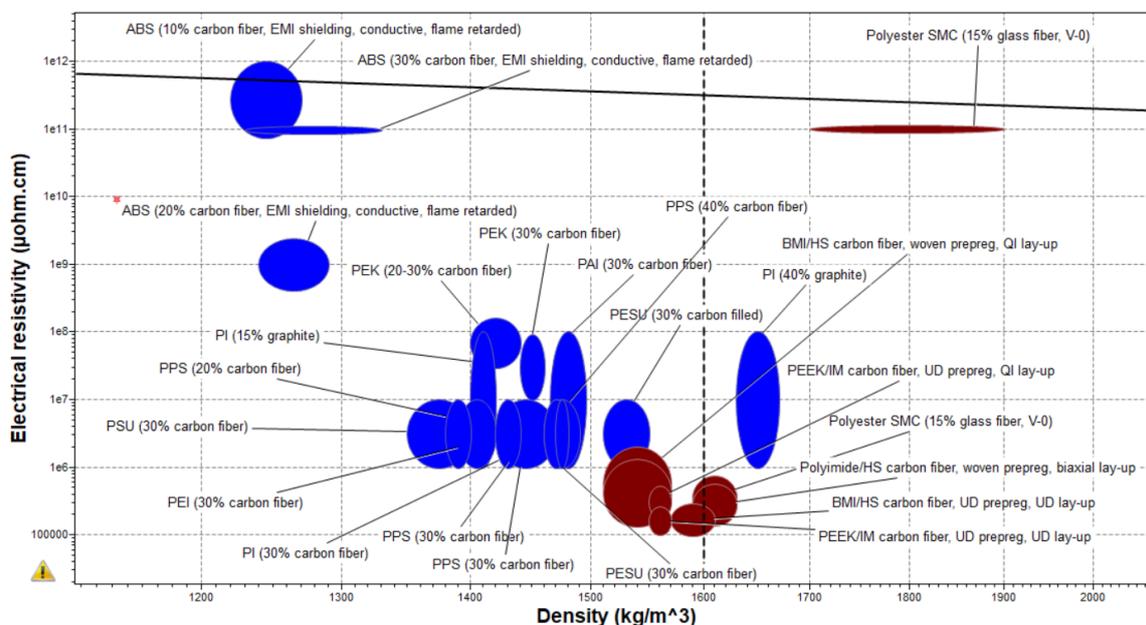
Na elaboração deste presente trabalho foi estabelecido um conjunto de regras que garantissem menor variabilidade para a realização da seleção de materiais. Para auxiliar o processo de seleção foi utilizado o software **Granta EduPack 2020 (nível 3)**. Durante a seleção foram cumpridas as quatro etapas que compreendem o método de **Ashby**: tradução, triagem, classificação e documentação. A tabela de tradução, presente na **Tabela 4**, está apresentando todo o modelamento do projeto de seleção de materiais. Com isso, espera-se guiar o projeto e estabelecer quais propriedades serão consideradas para a seleção e que requisitos servirão como restritores.

Tabela 4 - Modelamento do projeto de seleção de materiais

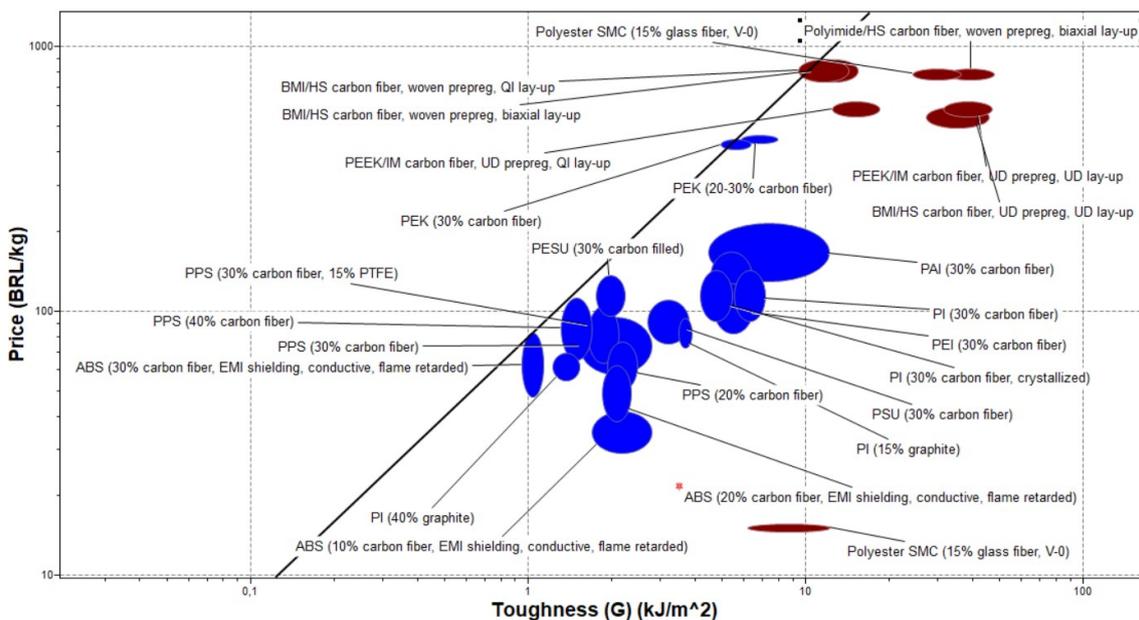
Função	O invólucro tem função de garantir a integridade das baterias de um veículo elétrico, nas condições normais de uso e em casos extremos, fazendo a manutenção dos carregamentos mecânicos, térmicos e sobre interferências eletromagnéticas
Restrições	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais poliméricos ou de matrizes poliméricas • Comportamento de retardante à chama • SE_T mínimo de proteção de acordo com condições explicitadas nas CISPR22 e CISPR25
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar tenacidade à fratura; • Minimizar densidade; • Maximizar EMI Shielding (minimizar resistividade elétrica); • Minimizar preço médio.
Variáveis livres	Material

5 Resultados e Discussões

Com as considerações apontadas na tradução do projeto (**Tabela 4**), os mapas de Ashby de interesse foram apontados, ponderando os índices de mérito que representam as propriedades de interesse por meio de suas respectivas retas diretriz. Tais gráficos estão apresentados na **Figura 7**.



(a)



(b)

Figura 7 - Gráficos de ASHBY após aplicação de filtros e índice de mérito: (a) densidade versus resistividade elétrica e (b) tenacidade versus preço (fonte: autor)

Alguns polímeros termoplásticos apareceram como candidatos na seleção feita com o gráfico de ASHBY, contudo eles foram desconsiderados após documentação, pois não apresentavam em seu descritivo o comportamento de maior interesse para o trabalho, o **EMI Shielding**. O potencial de aplicação EMI Shielding do material sob investigação foi constatado após confirmação na respectiva ficha do material pelo software **Granta EduPack 2020**. Vale ressaltar que não foi possível levar adiante um importante critério de restrição, os valores mínimos para efetividade de barreira (SE) em função da frequência de onda (em decibéis) expressos pela CISPR22 e 25, pois o software não permitia selecionar limites para EMI Shielding como propriedade de interesse.

Vale destacar que, na **Figura 7(a)** a reta diretriz foi administrada para minimizar o índice de mérito (1), e na **Figura 7(b)** a reta diretriz foi administrada para minimizar o índice de mérito (2). Os detalhes das curvas estão expressos na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Relação dos Índices de Méritos (IM) relacionados nos gráficos de Ashby

Índices de mérito	Inclinação	Valor de índice	Equacionamento IM
1	-1	$\leq 6,68e14$	$\frac{[Resistividade\ Elétrica]}{-1}}{[Densidade]}$
2	1	$\leq 78,7$	$\frac{[Preço]}{[Tenacidade\ (G)]}$

Na **Tabela 6**, temos a relação dos candidatos no projeto de seleção, já ranqueados de acordo com similaridade com os índices de mérito nas propriedades de interesse. Acabaram se destacando os materiais compósitos com matrizes de polímeros termoplásticos de engenharia, sendo os três mais bem colocados os compósitos de ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) e fibra de carbono.

Tabela 6 – Ranqueamento dos candidatos após aplicação do índice de mérito mostrando os materiais candidatos selecionados (*FR = Flame Retardant) (fonte: autor)

Rank	Classe	Material
1	Termoplástico	ABS (10% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i> , Flame Retardant (FR))
2	Termoplástico	ABS (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i> , FR)
3	Termoplástico	ABS (20% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i> , FR)
4	Termoplástico	PI (40% graphite, EMI <i>Shielding</i>)
5	Termoplástico	PI (15% graphite, EMI <i>Shielding</i>)
6	Termoplástico	PAI (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
7	Termoplástico	PVDF (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
8	Termoplástico	PESU (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
9	Termoplástico	PPS (40% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
10	Termoplástico	PPS (30% fibra de carbono, 15% de PTFE, EMI <i>Shielding</i>)
11	Termoplástico	PSU (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
12	Termoplástico	PI (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
13	Termoplástico	PPS (20% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)
14	Termoplástico	PEI (30% fibra de carbono, EMI <i>Shielding</i>)

Após a definição do *ranking* (classificação) é importante explorar a classificação de cada material, e fazer ressalvas sobre a subjetividade da escolha. A ordem de ranqueamento está associada aos índices de mérito estabelecidos e as proximidades de cada material com a curva, associando os dois gráficos. Após o ranqueamento não foram utilizados métodos para tomada de decisão.

Durante a etapa da documentação da seleção de materiais, os resultados adquiridos *via* metodologia de Ashby foram confrontados com uma variedade de materiais de matrizes poliméricas que comprovaram bom desempenho de blindagem eletromagnética. Estes materiais foram buscados em literatura pertinente, e estão elencados na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Variedade de materiais CPC's com desempenho de EMI Shielding [13]

Materials	% de carga	σ (S.cm ⁻¹)	SE_T (dB)	SE_A (dB)	SE_R (dB)	d (mm)	Freq.	Ref.
MWCNT/chlorinated PE	15 %	~0.01	36.0	-	-	2.0	X-band	[18]
TPV/NCGF	1.2%	0.066	34.4	30.1	4.0	2.0	X-band	[19]
ABS/ CB:CNT (25:75)	3.0%	0.029	29.37	23.99	4.91	2.0	X-band	[20]
S-PLLA/MWCNT	1.1%	0.25	30.0	26.0	4.0	1.5	X-band	[21]
R-PLLA/MWCNT	1.1%	3x10 ⁻⁵	22.0	19.5	2.5	1.5	X-band	[22]
S-PLLA/PCL/MWCNT/Ni	6.0% (Ni)	—	24–29	—	—	—	X-band	[22]
RGO-GF/UP	20.0% (GF)	—	21.3	18.2	2.7	10.0	X-band	[23]
Microcellular Polyimide (PI) /RGO/ MWCNTs composite	8% (RGO & MWCNT)	18.7x10 ⁻³	16.6	14.7	2.1	—	X-band	[24]
CF/polyacrylamide/ wood fiber (CPW) composite	7.5% (CF)	~10 ⁻³	41.03	—	—	—	X-band	[25]
PVDF/PS/ HDPE-MWCNTs	1.6%	0.9x10 ⁻³ @rc of 0.3%	31.7 9.5 GHz	29.1 @9.5GHz	2.6 @9.5GHz	—	X-band	

MWCNTs/waterborne polyurethane	10%	0.124	29	21.5	7.5	0.8	X-band	[26]
PPCP/MWCNT	4.6%	7.2×10^{-3}	47.8	42.5	5.4	2.0	X-band	[27]
Microcellular PI/RGO/MWCNTs	8%	0.0187	16.6–8.2	14.7	2.1	0.5	X-band	[24]
Ni coated RGO/PC/SAN	3%	—	29.4	—	—	—	8–18 GHz	[28]
MWCNT/PP	7.5 vol.%	—	34.8	26.8	8.0	1.0	X-band	[29]
Polyamide 6/EG	2.27 vol.%	5.5×10^{-3}	25.0	23.54	1.48	2.0	X-band	[19]
PP/MWCNT	20%	0.66	57.0	39.9	17.1	2.0	S-band	[30]
	20%	0.66	47.0	70%SET	30%SET	2.0	X-band	
	20%	0.66	44.0	70%SET	30%SET	2.0	Ku-band	
PMMA/Graphene foam	1.8 vol.%	31.1×10^{-3}	19.0	18.0	1.0	2.4	X-band	[31]
PI/RGO	16%	8.0×10^{-3}	20.0	17.6	2.4	0.8	X-band	[32]
σ : condutividade elétrica do material SE_T (dB): Efetividade de blindagem total SE_A (dB): Efetividade de blindagem por absorção SE_R (dB): Efetividade por refletância d: espessura do filme ensaiado Freq.: range de frequência investigada								

A partir da tabela acima é possível observar que há uma grande variedade de materiais CPC's com diferentes tipos de aditivação/dopagem/misturas que se propõem a alcançar propriedades de barreira eletromagnética. A lista vem para complementar e reafirmar alguns candidatos anteriormente pontuados com os gráficos de Ashby, como os compostos de ABS carregados com composto de carbono. Como destaque, G. George *et al.*, mostraram boas propriedades de barreira a partir de matriz polimérica de polipropileno com a inserção de cargas de Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) em uma concentração de 20% [32].

Zanni M *et al.* [33], em um relatório sobre emissões Eletromagnéticas de um veículo PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*), constatou que a maior parte das emissões produzidas pela parte elétrica se concentram na faixa de frequência de 2 a 150 KHz, devido à comutação dos eletrônicos de alta voltagem (HV-bus), essa faixa de frequência é chamada de “faixa de emissões conduzidas”. Os estudos considerados neste trabalho propõem a propriedade de efetividade de barreira (SE)

na faixa de 6-12 GHz, faixa de frequência conhecida como *X-Band* [34], banda de ondas eletromagnéticas mais comuns de intercomunicação de dispositivos *wireless*, sendo a região de espectro eletromagnético em que podem ocorrer a maior parte das interferências externas. Dessa forma, os materiais aqui relacionados terão boa propriedade de barreira contra recepção de ondas externas, contudo não é possível concluir se terão boa propriedade de barreira na faixa de frequência de emissão, o que seria interessante para manter os VEs como máquinas não poluidoras de ondas eletromagnéticas.

Uma boa propriedade de barreira irá variar conforme a “intensidade” da onda eletromagnética incidente (representada em dB) na superfície do material responsável pela blindagem. Caso a intensidade exceder a capacidade de retenção do material de blindagem, o mesmo falha e deixa parte da onda ser transmitida.

6 Considerações Finais e Tendências Futuras

A introdução de materiais poliméricos ou mesmo de matriz polimérica para aplicação em invólucros de bateria de veículos elétricos ainda está em estado incipiente. As principais empresas de produção de tecnologia em polímeros do mundo já têm se colocado no mercado com alguns possíveis candidatos para desbancar a dominação das ligas metálicas no *design* dessa peça. A troca da classe do material para esta peça é já dita como um movimento natural das grandes OEM's.

Por meio de um método convencional de seleção de materiais *via* Método de Ashby, foi possível encontrar uma gama de candidatos aptos a serem utilizados como invólucros de baterias de carros elétricos. Após a etapa de classificação, compósitos de matriz termoplástica de ABS aditivadas com retardantes de chama e reforçados com fibras de carbono se destacaram.

Na etapa de documentação foi explorado na literatura, analisado a sua reputação e principalmente seu comportamento comparado com outros materiais poliméricos que demonstraram efetividade de blindagem eletromagnética. É possível perceber que o material apresentado pela metodologia de Ashby tem propriedades abaixo das opções apresentadas na literatura, sendo estas indicadas na **Tabela 7**. Além disso, suas propriedades mecânicas não são as mais adequadas se comparadas às de um alumínio, ou mesmo de outras classes de materiais poliméricos prospectados na literatura. No entanto, vale ressaltar que a escolha de compósito de matriz polimérica

com dispersão de fibras de carbono está de acordo com a maior parte dos estudos encontrados na área, já que grande parte dos compósitos de matrizes poliméricas com adições de compostos carbonados surgem para incrementar as propriedades elétricas e magnéticas e, assim, refletir em bom comportamento de *EMI Shielding*.

Se considerado apenas a blindagem eletromagnética como propriedade-chave para a aplicação, os CPC's destacados pelo método convencional de Ashby já possuem características necessárias para atuarem como matéria prima para desenvolvimento de peças para a aplicação de invólucro. Além disso, são leves e de relativa fácil moldagem, quando comparados com a atual solução de ligas de alumínio usualmente empregadas.

A pesquisa por materiais poliméricos para blindagem eletromagnética, como ICP's e CPC's, vem crescendo a cada ano [13], mas para a aplicação como invólucro de baterias de carros elétricos está apenas começando. Pouco a pouco, as tecnologias desenvolvem-se em escala laboratorial e, a depender de sua viabilidade, tomam a indústria e são exploradas comercialmente.

Tanto as opções destacadas pelo método de Ashby, quanto as verificadas no levantamento realizado (**Tabela 7**) ainda não foram exploradas comercialmente no desenvolvimento de invólucros de baterias de carros elétricos em escala industrial. Assim, quando a tecnologia e a exploração comercial já estiverem consolidadas, recomenda-se uma reabordagem da seleção de materiais, realizando um comparativo robusto e mais realista das opções disponíveis para esta aplicação.

7 Referências

- [1] K. G. Høyer, “The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars”, *Util. Policy*, vol. 16, n° 2, p. 63–71, jun. 2008, doi: 10.1016/j.jup.2007.11.001.
- [2] S. Arora, W. Shen, e A. Kapoor, “Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, p. 1319–1331, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.013.
- [3] LINDSAY BROOKE, “Battle for the box”, 2023.
- [4] S. Arora e A. Kapoor, “Mechanical Design and Packaging of Battery Packs for Electric Vehicles”, *Green Energy Technol.*, vol. 0, n° 9783319699493, p. 175–200, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-69950-9_8.
- [5] M. S. Whittingham, “Lithium batteries and cathode materials”, *Chem. Rev.*, vol. 104, n° 10, p. 4271–4301, out. 2004, doi: 10.1021/cr020731c.
- [6] M. Winter e R. J. Brodd, “What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?”, *Chem. Rev.*, vol. 104, n° 10, p. 4245–4270, 2004, doi: 10.1021/cr020730k.
- [7] B. Sundén, “Thermal management of batteries”, *Hydrog. Batter. Fuel Cells*, p. 93–110, 2019, doi: 10.1016/b978-0-12-816950-6.00006-3.
- [8] M. R. (Musa R. Kamal, A. I. Isayev, e S.-J. Liu, *Injection molding: technology and fundamentals*. Hanser, 2009.
- [9] P. D. a A. de A. Lucas, D. a C. Lotti, e P. D. L. A. Pessan, *Moldagem Por Injeção de Termoplásticos*. Universidade Federal de São Carlos Departamento de Engenharia de Materiais Núcleo de Reologia e Processamento de Polímeros, 2013.
- [10] S. Guttowski, S. Weber, E. Hoene, W. John, e H. Reichl, “EMI in Electric Vehicles”, 2003.
- [11] Y. Guo, L. Wang, e C. Liao, “MODELING AND ANALYSIS OF CONDUCTED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN ELECTRIC VEHICLE POWER SUPPLY SYSTEM”, *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 139, p. 193–209, 2013, doi: 10.2528/PIER13031101.
- [12] ASTM, “Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials”, ASTM International, 2018. doi: 10.1520/D4935-18.
- [13] D. Jiang *et al.*, “Electromagnetic Interference Shielding Polymers and Nanocomposites - A Review”, *Polym. Rev.*, vol. 59, n° 2, p. 280–337, abr. 2019, doi: 10.1080/15583724.2018.1546737.
- [14] T. A. Osswald e G. Menges, *Material science of polymers for engineers*. Hanser Publishers, 2012.
- [15] P. K. Mallick, *Composites Engineering Handbook*. CRC Press, 1997. doi: 10.1201/9781482277739.
- [16] G. Barbiroli e M. Fiorini, “A Method to Calculate a Global Performance Index for Materials. An Application to Thermoplastic Polymers”, jan. 1992.
- [17] M. Ashby, *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*, 4ª. Elsevier, 2012. [Online]. Disponível em: www.elsevier.com.br
- [18] S. Mondal *et al.*, “Thermal-air ageing treatment on mechanical, electrical, and electromagnetic interference shielding properties of lightweight carbon nanotube based polymer nanocomposites”, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 107, p. 447–460, abr. 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.01.025.

- [19] H. Duan, M. Zhao, Y. Yang, G. Zhao, e Y. Liu, "Flexible and conductive PP/EPDM/Ni coated glass fiber composite for efficient electromagnetic interference shielding", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 29, n° 12, p. 10329–10336, jun. 2018, doi: 10.1007/s10854-018-9089-x.
- [20] D. P. Schmitz, T. I. Silva, S. D. A. S. Ramoa, G. M. O. Barra, A. Pegoretti, e B. G. Soares, "Hybrid composites of ABS with carbonaceous fillers for electromagnetic shielding applications", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 135, n° 29, p. 46546, ago. 2018, doi: 10.1002/app.46546.
- [21] K. Zhang *et al.*, "Ultralow percolation threshold and enhanced electromagnetic interference shielding in poly(L-lactide)/multi-walled carbon nanotube nanocomposites with electrically conductive segregated networks", *J. Mater. Chem. C*, vol. 5, n° 36, p. 9359–9369, 2017, doi: 10.1039/C7TC02948A.
- [22] Y.-D. Shi *et al.*, "Low magnetic field-induced alignment of nickel particles in segregated poly(l-lactide)/poly(ϵ -caprolactone)/multi-walled carbon nanotube nanocomposites: Towards remarkable and tunable conductive anisotropy", *Chem. Eng. J.*, vol. 347, p. 472–482, set. 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.04.147.
- [23] X. Wan, H. Lu, J. Kang, S. Li, e Y. Yue, "Preparation of graphene-glass fiber-resin composites and its electromagnetic shielding performance", *Compos. Interfaces*, vol. 25, n° 10, p. 883–900, out. 2018, doi: 10.1080/09276440.2018.1439641.
- [24] H. Yang, Z. Yu, P. Wu, H. Zou, e P. Liu, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of microcellular polyimide/in situ thermally reduced graphene oxide/carbon nanotubes nanocomposites", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 434, p. 318–325, mar. 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.10.191.
- [25] B. Dang, Y. Chen, N. Yang, B. Chen, e Q. Sun, "Effect of carbon fiber addition on the electromagnetic shielding properties of carbon fiber/polyacrylamide/wood based fiberboards", *Nanotechnology*, vol. 29, n° 19, p. 195605, maio 2018, doi: 10.1088/1361-6528/aab243.
- [26] T. K. Gupta, B. P. Singh, S. R. Dhakate, V. N. Singh, e R. B. Mathur, "Improved nanoindentation and microwave shielding properties of modified MWCNT reinforced polyurethane composites", *J. Mater. Chem. A*, vol. 1, n° 32, p. 9138, 2013, doi: 10.1039/c3ta11611e.
- [27] P. Verma, P. Saini, R. S. Malik, e V. Choudhary, "Excellent electromagnetic interference shielding and mechanical properties of high loading carbon-nanotubes/polymer composites designed using melt recirculation equipped twin-screw extruder", *Carbon*, vol. 89, p. 308–317, ago. 2015, doi: 10.1016/j.carbon.2015.03.063.
- [28] S. P. Pawar, S. Stephen, S. Bose, e V. Mittal, "Tailored electrical conductivity, electromagnetic shielding and thermal transport in polymeric blends with graphene sheets decorated with nickel nanoparticles", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 17, n° 22, p. 14922–14930, 2015, doi: 10.1039/C5CP00899A.
- [29] M. H. Al-Saleh e U. Sundararaj, "Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites", *Carbon*, vol. 47, n° 7, p. 1738–1746, jun. 2009, doi: 10.1016/j.carbon.2009.02.030.
- [30] G. George *et al.*, "Morphological, dielectric, tunable electromagnetic interference shielding and thermal characteristics of multiwalled carbon nanotube incorporated polymer nanocomposites: A facile, environmentally benign and cost effective approach realized via polymer lat", *Polym. Compos.*, vol. 39, n° S2, p. E1169–E1183, maio 2018, doi: 10.1002/pc.24689.
- [31] H.-B. Zhang, Q. Yan, W.-G. Zheng, Z. He, e Z.-Z. Yu, "Tough

- Graphene–Polymer Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 3, n° 3, p. 918–924, mar. 2011, doi: 10.1021/am200021v.
- [32] Y. Li, X. Pei, B. Shen, W. Zhai, L. Zhang, e W. Zheng, “Polyimide/graphene composite foam sheets with ultrahigh thermostability for electromagnetic interference shielding”, *RSC Adv.*, vol. 5, n° 31, p. 24342–24351, 2015, doi: 10.1039/C4RA16421K.
- [33] European Commission. Joint Research Centre., *Electromagnetic emissions assessment of a plug-in hybrid electric vehicle in dynamic driving conditions*. LU: Publications Office, 2022. Acesso em: 16 de agosto de 2023. [Online]. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/666427>
- [34] INTERNATIONAL AMATEUR RADIO UNION REGION, “VHF MANAGERS HANDBOOK”. INTERNATIONAL AMATEUR RADIO UNION REGION 1. Acesso em: 16 de agosto de 2023. [Online]. Disponível em: https://www.iaru-r1.org/wp-content/uploads/2021/03/VHF_Handbook_V9.01.pdf