

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM  
PROCESSAMENTO DE MATERIAIS - PPGPM

RENATO K. F. MOREL

**APLICAÇÃO DO GRAFENO NA OTIMIZAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE  
ELÉTRICA EM BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO  
EM BARRAMENTOS BLINDADOS – *BUSWAY***

**APPLICATION OF GRAPHENE IN THE OPTIMIZATION OF ELECTRICAL  
CONDUCTIVITY IN ALUMINUM CONDUCTOR BARS IN BUSBAR  
TRUNKING SYSTEMS – *BUSWAY***

São José dos Campos, SP  
2024

RENATO K. F. MOREL

**APLICAÇÃO DO GRAFENO NA OTIMIZAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE  
ELÉTRICA EM BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO  
EM BARRAMENTOS BLINDADOS – *BUSWAY***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Processamento de Materiais, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Processamento de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Lucia Vieira

São José dos Campos, SP

2024

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

### Ficha catalográfica

Morel, Renato K. F.  
Aplicação do grafeno na otimização da condutibilidade elétrica em barras condutoras de alumínio em barramentos blindados - busway / Renato K. F. Morel; orientadora, Lucia Vieira. - São José dos Campos, SP, 2024.  
61 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais.

Inclui referências

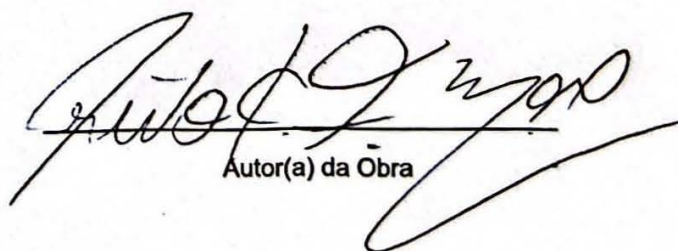
I. Processamento de Materiais. 2. Grafeno. 3. Alumínio. 4. Barramentos blindados. 5. Condutores. I. Vieira, Lucia, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Renato K. F. Morel, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 24 de Abril de 2024.



Autor(a) da Obra

Data da defesa: 27, 02, 2024

---

**RENATO KOGIMA FRANCESA MOREL**

**“APLICAÇÃO DO GRAFENO NA OTIMIZAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE ELÉTRICA EM  
BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO EM BARRAMENTOS BLINDADOS -  
BUSWAY.”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

Fernando dos S. Ortega	<i>Fernando dos S. Ortega</i>
Lucia Vieira	<i>Lucia Vieira</i>
Helio E. Sueta	<i>Helio E. Sueta</i>
Tiago M. B. Campos	<i>Tiago M. B. Campos</i>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 27 de fevereiro de 2024.

## RESUMO

Considerando a crescente utilização de condutores elétricos ao redor do mundo e sua possibilidade de escassez, existe uma grande necessidade do mercado na área de condutores para produção de equipamentos de potência, energias renováveis, eletroeletrônicos, veículos elétricos, entre outros produtos, gerar constante necessidade de busca de novos materiais que possam substituir o cobre como principal material condutor utilizado pela indústria. Pesquisas intensivas estão em andamento em todo o mundo para desenvolver novos materiais condutores para aplicações na indústria de energia. Tais pesquisas visam aumentar a condutividade elétrica de materiais para condutores e cabos, aumentando assim a capacidade de transporte de corrente nos condutores de energia. Para tanto, este trabalho visa otimizar equipamentos já devidamente consagrados no mercado e potencializar suas condições de condutividade e dissipação térmica. Desta forma neste trabalho foi proposto a aplicação de grafeno em barramentos blindados de alumínio, buscando a criação de um revestimento alumínio-grafeno, que permita uma melhoria na condutividade do material e produção de barramentos blindados com um menor volume e uma capacidade de condução de corrente elétrica próxima ou superior ao dos barramentos de cobre. Foram realizadas medições de condutividade em barras condutoras de alumínio revestidas com grafite aplicado através de técnica de Laser Cladding, bem como a aplicação superficial de grafeno nas barras condutoras de alumínio em sua liga 6101 e posterior análise dos resultados das propriedades de condutividade elétricas e dissipação térmica para aplicação em sistemas de Barramentos Blindados obtidos após o processo de aplicação superficial de grafeno sob as barras de Alumínio.

**Palavras-chave:** grafeno; alumínio; barramentos blindados; condutores; carcaça.

## ABSTRACT

Considering the growing use of electrical conductors around the world and the possibility of their scarcity, there is a great need in the market in the area of conductors for the production of power equipment, renewable energies, electronics, electric vehicles, among other products, generating a constant need for search for new materials that can replace copper as the main conductive material used by industry. Intensive research is underway around the world to develop new conductive materials for applications in the energy industry. Such research aims to increase the electrical conductivity of materials for conductors and cables, thus increasing the current carrying capacity in energy conductors. Therefore, this work aims to optimize equipment already duly established in the market and to enhance its conditions of conductivity and thermal dissipation. Thus, in this work, the application of graphene in armored aluminum busbars was proposed, seeking the creation of an aluminum-graphene coating, which allows an improvement in the conductivity of the material and production of busbars trunking systems with a smaller volume and a current conduction capacity close or superior to that of copper bars. Conductivity measurements were carried out on aluminum conductor bars coated with graphite applied through the Laser cladding technique, as well as the surface application of graphene on aluminum conductor bars in its 6101 alloy and subsequent analysis of the results of electrical conductivity and thermal dissipation properties for application in busbars trunking systems obtained after the surface application process of graphene under the aluminum bars.

**Keywords:** graphene; aluminum; busbars trunking systems; conductors; shield.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos de Barramento blindado “Air insulated” ou barras espaçadas e modelo “Sandwich type” ou barras coladas.....	20
Figura 2 - Fluxograma do tratamento de superfície contra corrosão galvânica e oxidação .....	22
Figura 3 - Alótropos do elemento de Carbono.....	23
Figura 4 - Estrutura Hexagonal.....	25
Figura 5 - Construção de materiais com outras dimensionalidades a partir de uma folha de grafeno.....	27
Figura 6 - Obtenção do grafeno por eletrólise.....	35
Figura 7 - Método Hammers.....	37
Figura 8 - Esquema do processo Laser Cladding.....	38
Figura 9 - Medidor de condutividade elétrica modelo DC-11M.....	42
Figura 10 - Laser cladding FH FLYER MARKING HEAD Laboratório IEAvCTA ITA .....	43
Figura 11 - Barras de alumínio antes da deposição da solução de grafeno antes do tratamento.....	44
Figura 12 - Barramento após o tratamento com grafeno.....	44
Figura 13 - Amostras de alumínio revestidos de grafite.....	45
Figura 14 - medição de condutividade elétrica das barras revestidas com grafite.....	47
Figura15 - insumos utilizados para aplicação superficial do grafeno.....	48
Figura16 - Medição de condutividade elétrica das barras revestidas com grafeno.....	49
Figura 17 - Arranjo físico do experimento.....	50
Figura 18 - Dimensões Barramento blindado de 1000 A.....	51
Figura 19 - Desenho do arranjo físico de ensaio de elevação de temperatura.....	52
Figura 20 - Desenho do arranjo físico de ensaio de elevação de temperatura com barras de alumínio com revestimento em grafeno.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema de classificação de ligas de alumínio e áreas de aplicação.....	15
Tabela 2 - Contém as variações das ligas específicas classe 6xxx e suas características mecânicas.....	16
Tabela 3 - Composição de metais nas ligas de alumínio conforme sistema ABNT/ASTM.....	16
Tabela 4 - Áreas de aplicação do grafeno.....	29
Tabela 5 - Características técnicas Cobre x Alumínio x Grafeno.....	31
Tabela 6 - Resultados dos parâmetros de aplicação do laser sobre as barras de alumínio .....	46
Tabela 7 - Resultados dos parâmetros das medições de condutividade elétricas expressos em IACS e (M*S/m) .....	49
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de elevação de temperatura nos barramentos blindados sob liga 6101 com revestimento superficial contra corrosão galvânica e oxidação, conforme Figura 2 .....	54
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de elevação de temperatura nos barramentos blindados com revestimento superficial através de pintura de grafeno.....	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACSR	Alumínio Condutor de Aço Reforçado
AL	Alumínio
CMC	Carboximetilcelulose
IACS	International Annealed Copper Standard
CU	Cobre
AA	Aluminum Association
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

## LISTA DE SÍMBOLOS

MS/m	Conductividade elétrica – Mega Siemens / metro
$\Omega$ .m	Conductividade elétrica – Ohms / metro
R	Resistividade elétrica – Ohms
G	Condutância elétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
3.1	MATERIAIS CONDUTORES COBRE, ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	14
3.2	BARRAMENTOS BLINDADOS.....	17
3.3	SUPERCONDUTORES.....	20
3.4	MATERIAIS UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS.....	21
3.5	CARBONO.....	22
<b>3.5.1</b>	<b>Grafite</b> .....	23
<b>3.5.2</b>	<b>Grafeno</b> .....	24
3.6	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NOMENCLATURAS INTERNACIONAIS.....	29
3.7	CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO DO GRAFENO.....	31
3.8	MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE GRAFENO.....	33
<b>4</b>	<b>TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO DOS ALÓTROPIS DE CARBONO</b> .....	38
4.1	LASER CLADDING.....	38
4.2	APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO DE GRAFENO NAS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE PINTURA.....	40
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	41
5.1	BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO.....	41
5.2	GRAFITE.....	41
5.3	GRAFENO.....	41
5.4	DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE .....	42
5.5	MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE GRAFITE E GRAFENO SOBRE AS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO.....	43
<b>5.5.1</b>	<b>Deposição de grafite via Laser Cladding em amostra de barras de alumínio</b> .....	43
<b>5.5.2</b>	<b>Deposição de solução grafeno através de pintura em amostra de barras de alumínio Liga 6101</b> .....	44
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	46
6.1	RESULTADOS DA DEPOSIÇÃO DE GRAFITE NA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DE ALUMÍNIO .....	45
6.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO DE GRAFENO NAS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE PINTURA .....	48
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	56
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	58
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia elétrica é cada vez mais necessária, com diversas aplicações, tanto na indústria e comércio, como também nas utilizações em residências e ambientes externos. Para atender a todos estes locais é necessária a utilização de condutores que sejam capazes de transportar e distribuir a energia elétrica (Zarbin; Oliveira, 2013).

O principal material utilizado nestes condutores é o cobre, porém sua utilização no Século XXI leva a algumas problemáticas, como a limitada disponibilidade deste material com relação a demanda exigida, além das novas aplicações deste material, utilizado em eletrônicos, veículos elétricos, motores elétricos, entre diversas outras, aumentando o custo dos condutores e reduzindo o seu custo-benefício (Zarbin, Oliveira, 2013).

Os barramentos blindados são condutores de energia em substituição aos cabos comuns, onde possuem devidos condutores de fase e neutro dentro de um involucro externo, formando assim praticamente um corpo único (Zimmermann, 2019). Os barramentos blindados devem suportar a passagem de uma determinada corrente elétrica de forma contínua, com a possibilidade de picos de corrente, para isso são utilizados materiais com boa condutividade, como o cobre e o alumínio, apesar do cobre ser o material mais comum para este tipo de sistema, vista a sua boa condutividade, a aplicação do alumínio vem se expandindo ao longo dos últimos anos por seu fácil manuseio e quantidade disponível a nível nacional, possibilitando custos menores de fabricação e atendendo a demanda cada vez maior do crescente mercado de Barramentos blindados para a construção civil, aeroportos, shopping centers, hospitais e diversas industriais ao redor do mundo (Zimmermann, 2019).

Considerando que o grafeno é um dos materiais mais promissores dos últimos tempos, principalmente no tocante a condutividade, dissipação térmica e resistência a corrosão, o grafeno será utilizado como revestimento nas superfícies das barras de alumínio e carcaça de chapa de aço carbono dos barramentos blindados (Zimmermann, 2019).

Quanto a extração, manuseio e manufatura do grafeno ainda será solucionado com um maior tempo de pesquisas e desenvolvimento do material, sendo interessante buscar formas de utilização do grafeno em pequenas escalas para solucionar as problemáticas atuais (Zimmermann, 2019).

Além da manipulação do grafeno ser desafiadora, sendo altamente suscetível a danos e mudanças estruturais durante a manipulação, ele ainda é uma substância extremamente fina e delicada, que pode ser facilmente danificada por manipulação mecânica, por exemplo. Além de ser altamente sensível a impurezas e contaminantes em sua superfície, o que poderia afetar suas propriedades (Zimmermann, 2019).

Sendo assim, neste trabalho visa obter resultados substanciais na condutividade elétrica das barras condutoras de alumínio e carcaça dos barramentos blindados após aplicação das camadas superficiais de grafeno com intuito de aumentar a condutividade das barras condutoras e dissipação térmica na carcaça de chapa de aço carbono dos barramentos blindados.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi o estudo da melhoria da condutividade elétrica de barras de alumínio com uso de revestimento de grafite e grafeno.

Destacando-se como objetivos específicos:

- a) Aplicar grafeno sobre barras de alumínio e avaliar viabilidade da aplicação como revestimento em barras condutoras de alumínio;
- b) Melhorar condutividade de corrente elétrica nas barras condutoras de alumínio, internamente aos barramentos blindados;
- c) Analisar condutibilidade térmica na superfície das barras de alumínio, bem como dissipação térmica do conjunto.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico foram considerados os principais temas relacionados aos estudos de condutores historicamente conhecidos como o cobre e alumínio, bem como a descrição das ligas de barras condutoras em alumínio, tratamentos utilizados no mercado, também serão abordados as descrições técnicas e métodos de aplicação do grafite e grafeno na superfície das barras condutoras de alumínio.

#### 3.1 MATERIAIS CONDUTORES: COBRE, ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Cobre:

Símbolo do cobre é proveniente de (cuprum) Cu e número atômico 29, é o primeiro metal do grupo 11 da Tabela Periódica. O metal cobre possui coloração avermelhada, é o único metal, junto ao ouro, que não tem a coloração prateada, que é uma característica dos metais. É também um metal dúctil e maleável (Brasil Escola UOL, 2021).

O principal mineral de cobre é a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), sendo a malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ), calcantita ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), atacamita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ), azurita ( $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ ) e cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) outras fontes minerais interessantes de cobre.

O principal uso do cobre se deve a condutibilidade elétrica e térmica. Aliás, o grupo do cobre na Tabela Periódica contém os três maiores condutores de eletricidade: prata, cobre e ouro (em ordem de condutibilidade). Assim, o cobre é empregado na fabricação de fios, cabos condutores, conectores de aterramento, entre outros usos (Brasil Escola UOL, 2021).

Alumínio:

O alumínio é um elemento químico cuja sigla é Al, apresenta número atômico igual a 13 e número de massa aproximadamente igual a 27 u ("u" significa unidade de massa atômica e representa 1/12 da massa atômica do elemento carbono). Assim, um átomo de alumínio é 2,25 vezes mais pesado que um átomo de carbono.

Trata-se de um elemento de característica metálica (metal) e está localizado no terceiro período da família do Boro (família IIIA).

O alumínio é encontrado na natureza apenas na forma de minério, ou seja, faz parte da composição de uma substância mineral (Brasil Escola UOL, 2021).

O minério mais comum em que encontramos o alumínio é a bauxita. Sendo que ele apresenta na composição óxido de alumínio hidratado ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ).

Ligas de Alumínio:

O alumínio é muito utilizado na forma de ligas metálicas. Essas ligas metálicas são formadas a partir da simples mistura do metal alumínio com outros metais ou não metais. Abaixo temos alguns exemplos de ligas metálicas de alumínio:

Liga de Alumínio (Al) e Cobre (Cu)

Liga de Alumínio (Al), Cobre (Cu) e Silício (Si)

Liga de Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Silício (Si)

Liga de Alumínio (Al), Zinco (Zn) e Cobre (Cu)

Liga de Alumínio (Al) e Lítio (Li)

Liga de Alumínio (Al) e Magnésio (Mg)

Liga de Alumínio (Al) e Silício (Si)

Liga de Alumínio (Al) e Manganês (Mn)

Na tabela 1 contém as diversas classificações e composições das ligas de alumínio e suas determinadas áreas de aplicação.

*Tabela 1 - Sistema de classificação de ligas de alumínio e áreas de Aplicação.*

Série	Composição Química	Principais aplicações
1XXX	Al comercialmente Puro	Cabos de alumínio, utensílios domésticos, trocadores de calor
2XXX	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria Aeronáutica
3XXX	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas. Painéis
4XXX	Al-Si	Metal de adição para soldas. Pistões forjados de motores
5XXX	Al-Mg	Aplicações náuticas (navios e barcos), tanques para transporte de combustíveis e produtos especiais
6XXX	Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos. Componentes automotivos
7XXX	Al-Zn e Al-Zn-Mg	Indústria aeronáutica
8XXX	Outras Ligas (Al-Li, Al-Fe...)	Laminados Finos (folhas), e outras para embalagens descartáveis

Fonte: Aluminum Association Databook) (2000).

A tabela 2 contém as variações das ligas específicas classe 6xxx e suas características mecânicas.

*Tabela 2 - Características técnicas das ligas conforme sistema ABNT/ASTM.*

Liga ABNT ASTM	DIN	Têmpera	Limite de Resistência à Tração Mpa (N/mm <sup>2</sup> )Mín.	Limite de Resistência à Tração Mpa (N/mm <sup>2</sup> )Máx.	Limite de Escoamento Mpa (N/mm <sup>2</sup> )Mín.	Alongamento Mínimo "50mm"(%)	Dureza Brinell (HB)
6060	Al Mg Si0,5	T5	145	-	105	8	60
6061	Al Mg Si Cu	T4	180	-	110	16	65
		T6	260	-	240	8	95
6063	Al Mg Si0,5	T5	145	-	105	8	60
6101	E-Al Mg Si0,5	T6	200	-	172	8	78

Fonte: Aluminum Association Databook (2000).

Na tabela 3 contém as variações das ligas específicas classe 6xxx e a incidência de outros metais.

*Tabela 3 - Composição de metais nas ligas de alumínio conforme sistema ABNT/ASTM.*

Liga ABNT/ASTM	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Outros Cada (%)	Outros Total (%)
6060	restante	0,30	0,10	0,10	0,10	0,35	0,05	0,15	0,10	0,05	0,15
		0,60	0,30			0,60					
6061	restante	0,40	0,70	0,15	0,15	0,80	0,04	0,25	0,15	0,05	0,15
		0,80	0,40			1,20	0,35				
6063	restante	0,20	0,35	0,10	0,10	0,45	0,10	0,10	0,10	0,05	0,15
		0,60				0,90					
6101	restante	0,30	0,50	0,10	0,03	0,35	0,03	0,10		0,03	0,10
		0,70				0,80					

Fonte: Aluminum Association Databook (2000).

Considerando a aplicação e fundamentação deste trabalho utilizaremos a liga 6101 considerando 53 a 59% de *International Annealed Copper Standard* (IACS) nominal, de acordo com Tabela 3 do Aluminum Association Databook. Cabe lembrar que 100% IACS corresponde a 58 MS/m (milhões de Siemens por metro) (LIU, et. al., 2016). A principal vantagem da utilização do % IACS sobre o MS/m é que a unidade % IACS implica que as medições foram feitas à temperatura de 20°C (293K ou 68°F) enquanto MS/m não especifica temperatura.

### 3.2 BARRAMENTOS BLINDADOS

Os barramentos blindados empregados em instalações elétricas são conjuntos de barras chatas condutoras de eletricidade, geralmente de cobre ou de alumínio, com cantos arredondados, elaborados para transmitir e distribuir correntes elétricas elevadas, principalmente, de 100 A a 6.000 A. Eles são recobertos, em geral, por invólucros metálicos retangulares, que comumente podem ser de aço carbono zincado ou de alumínio (Cunha, 2009). Essas barras condutoras ficam suportadas nos isoladores – isoladas umas das outras e do invólucro. Os materiais isolantes podem ser diversos, como fitas especiais, resina epóxi, plástico reforçado, fibra de vidro, cerâmica etc. Eles podem ainda ser de mais de um tipo, misturando materiais, resultando em polímeros termoplásticos como o PPS (Polisulfeto de fenileno), sendo nesse elemento que se deu a principal evolução tecnológica do produto. Os materiais desenvolvidos têm se tornado cada vez mais resistentes e maleáveis. A escolha do isolador, depende da aplicação do barramento, da tensão e do seu fabricante (Cunha, 2009).

Os barramentos de baixa tensão, até 1.000 Volts, têm, em geral, o tamanho padrão de três metros de comprimento e são divididos em dois tipos mais comuns: os barramentos blindados de barras espaçadas e os de barras coladas (Cunha, 2009).

Nos barramentos de barras espaçadas, as barras condutoras estão dispostas paralelamente, de forma a manter uma isolação entre elas. Este é o tipo mais comum para fazer derivação de corrente, também popularmente conhecido como barramentos destinados a usar plugin. Isso porque os barramentos têm, com espaçamentos regulares, tomadas pré-determinadas de conexão rápida, chamadas de plugins, que são elementos de contatos, nas quais podem ser ligados equipamentos como máquinas e motores ou ser transferida a corrente para outro caminho por cabos, por exemplo (Cunha, 2009).

Os barramentos blindados de baixa tensão podem ser usados em aplicações industriais, residenciais e comerciais. Nos últimos 15 anos, as linhas elétricas pré-fabricadas deram um salto em popularidade e utilização (Cunha, 2009).

O aumento de popularidade e utilização se deve, especialmente, ao mercado de construção civil, que passou a empregar esses produtos. Muitos edifícios residenciais começaram a ser construídos com barramentos blindados como forma

de distribuir a energia para os apartamentos, ao invés de utilizar fios e cabos na prumada elétrica (Cunha, 2009).

Antigamente para se fazer a alimentação dos andares dos edifícios eram usados cabos elétricos. Então, juntava-se um monte de cabos ou colocava-os dentro de uma calha e levava para os andares. Hoje tudo isso é substituído por um único barramento (Cunha, 2009).

Nos edifícios residenciais, os barramentos blindados são dispostos na vertical, no espaço de construção, do qual é derivada a energia para os andares e de onde será distribuída a eletricidade para cada apartamento e, na horizontal, desde o quadro de proteção até a base da prumada (Cunha, 2009).

No mesmo período em que os barramentos blindados começaram a ser utilizados para fazer instalação elétrica principal de edifícios residenciais e comerciais, começou a haver uma popularização de outro processo, o de descentralização da medição de energia. Apesar de não ser permitida apenas pela utilização de barramentos blindados (medição não centralizada também pode ser realizada em edificações com instalação de cabos), também conhecido como energia não medida (E.N.M), a questão teve uma compatibilidade técnica muito grande com sistemas de linhas elétricas pré-fabricadas “busway”, facilitando a utilização de medidores de energia por andar (Cunha, 2009).

No sistema convencional, a medição de energia é realizada num centro de medição localizada na área comum do edifício, no nível térreo ou subsolo. Nesse caso, a queda de tensão, considerada uma perda técnica, provocada pela passagem de corrente elétrica pelo condutor, por determinação das concessionárias de energia não pode ultrapassar média de 2% do quadro do centro de medição ao quadro de distribuição das unidades consumidoras (Cunha, 2009).

Considerando a crescente utilização dos barramentos blindados com medição eletrônica descentralizada, ou por andar, a medição passa a não ser mais localizada no nível da rua. O aumento do percurso da corrente elétrica até o medidor poderia gerar uma queda de tensão maior, assim como uma perda Joule por aquecimento do condutor ainda maior. Na prática o custo dessa perda ficaria a cargo da concessionária de energia (Cunha, 2009).

Visando evitar perdas financeiras significativas, as concessionárias passam a exigir limites máximos de queda de tensão que variam de 1 a 5% entre o ponto de

entrega e ponto de medição, dependendo da região e da concessionária de energia do Brasil (Cunha, 2009).

A queda de tensão está relacionada as perdas por aquecimento, mas não só ela. Quanto maior as distâncias percorridas por esses barramentos blindados, maior são as perdas a serem consideradas, desta forma os condutores dos barramentos blindados devem ser maximizados, visando vencer estas quedas de tensão (Cunha, 2009).

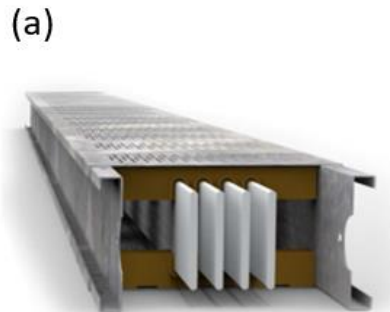
Barramentos na horizontal podem ser também encontrados em indústrias e comércios, como shoppings centers, para facilitar a distribuição da energia para cada loja abaixo da linha elétrica (Cunha, 2009)

Os barramentos blindados de baixa tensão podem ainda conter as barras coladas uma à outra, sem espaço de isolamento. Nesse caso, é comum que os fabricantes façam o isolamento com fita, encapsulando as barras. Este tipo de barramento é mais utilizado para transmissão de energia (Cunha, 2009).

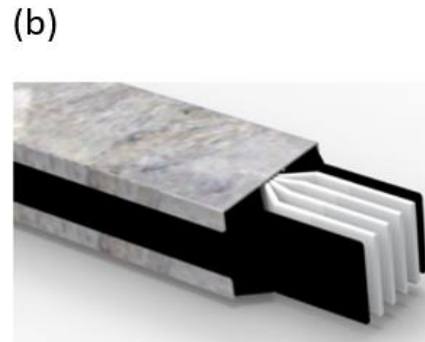
Na distribuição de energia, apesar de possível, não é usual, dada a complexidade apresentada, pois, para derivar corrente no tipo barra colada, é preciso separar as barras antes de acoplar uma caixa plugin que irá distribuir energia (Cunha, 2009).

A figura1 contém uma representação esquemática de um barramento com barras espaçadas na Figura 1(a) e na Figura 1(b) o modelo sanduiche com barras coladas.

Figura 1- Modelos de barramento blindado



“Air insulated” - barras espaçadas



“Sandwich type”- barras coladas

Fonte: Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

### 3.3 MATERIAIS SUPERCONDUTORES

Procurando buscar alternativas em relação aos condutores elétricos conhecidos, muito se estudou e pesquisou na área de supercondutores ao longo dos últimos anos. Considera-se a aplicação de supercondutores para melhorar o transporte e distribuição de corrente elétrica, possuindo uma resistência próxima de zero e uma baixa dissipação de energia elétrica, próxima de zero (Llewellyn; Tipler, 2005).

Estes condutores são utilizados no enrolamento de eletroímãs, porém, obtendo um custo elevado e a necessidade de trabalho em temperaturas baixas para reduzir obter a condutividade desejada (Liu *et al.*, 2006).

Um exemplo deste tipo de material é o supercondutor  $H_2S$  que diferente de outros supercondutores, possui temperatura de funcionamento de 200 kelvins, aproximadamente  $-73\text{ }^{\circ}C$ , com a possibilidade de utilização em alta pressão atmosférica, algo que não é comum na maioria dos supercondutores (Kim; Abdala; Macozco, 2011).

Temperaturas extremamente baixas não são mais um requisito para gerar supercondutividade, e a descoberta de materiais supercondutores operando em

temperatura acima de 0 °C, e mais próxima da temperatura ambiente, poderia encontrar aplicação na tecnologia de transmissão atual, onde perdas por resistência em linhas de transmissão poderiam ser quase que completamente evitadas (Liu *et al.*, 2006).

### 3.4 MATERIAIS UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS DAS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO INTERNAMENTE AOS BARRAMENTOS BLINDADOS.

Tratamento superficial contra corrosão galvânica e oxidação tendo como elementos principais aplicação de (Zn+Cu+Sn):

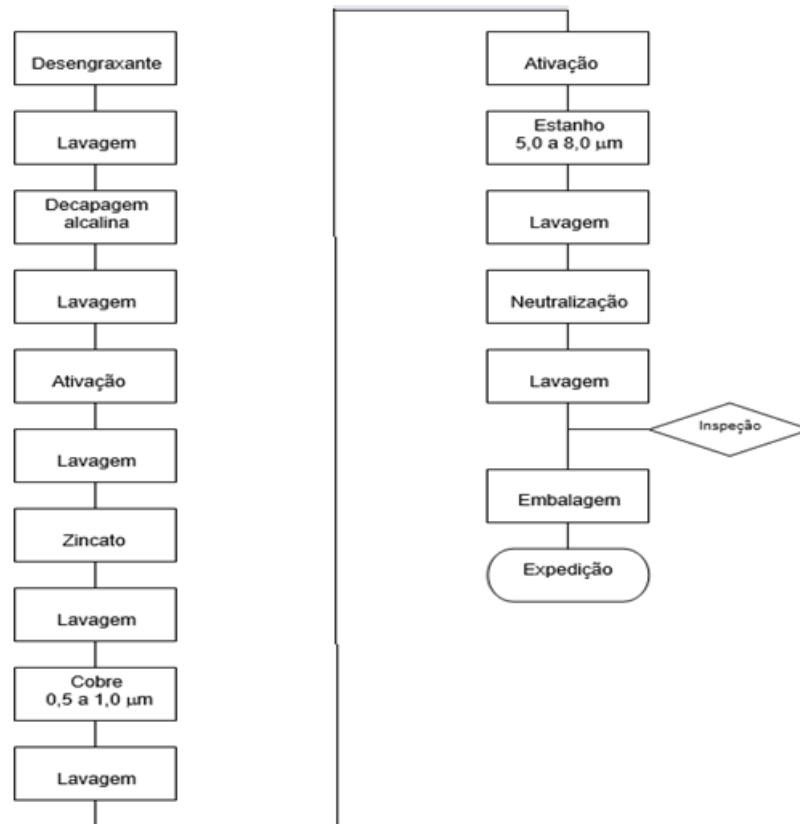
Atualmente no mercado de revestimentos superficiais em barras condutoras de alumínio visando mitigar a oxidação e corrosão realiza-se aplicação de revestimento superficial para a liga 6101, envolvendo as seguintes matérias (zinco, cobre e estanho (GALTEC, 2008).

A Figura 2 contém um fluxograma do tratamento de superfície e pode-se observar que o fluxograma do tratamento de superfície atualmente utilizados nas barras de alumínio liga 6101 para proteção contra corrosão galvânica e oxidação, além de prover acoplamento com condutores de cobre sem ter problemas de corrosão galvânica.

O processo de tratamento de superfície consiste em um processo eletroquímico, tendo como primeira aplicação uma camada de 1 µm a base de Zincato, com toda preparação previa para receber tal aplicação; iniciando com desengraxe, lavagem, decapagem alcalina, de lavagem de ativação, lavagem novamente para receber o Zincato propriamente dito (GALTEC, 2008).

Posterior ao processo de lavagem e logo em seguida recebe uma camada de 1 a 2 µm de Cobre. Seguidos por lavagem e ativação para a última camada de 5 a 8 µm de Estanho e finalmente lavagem, neutralização e lavagem final para seguir para inspeção como último estágio (GALTEC, 2008).

Figura 2 – Fluxograma do tratamento de superfície contra corrosão galvânica e oxidação.



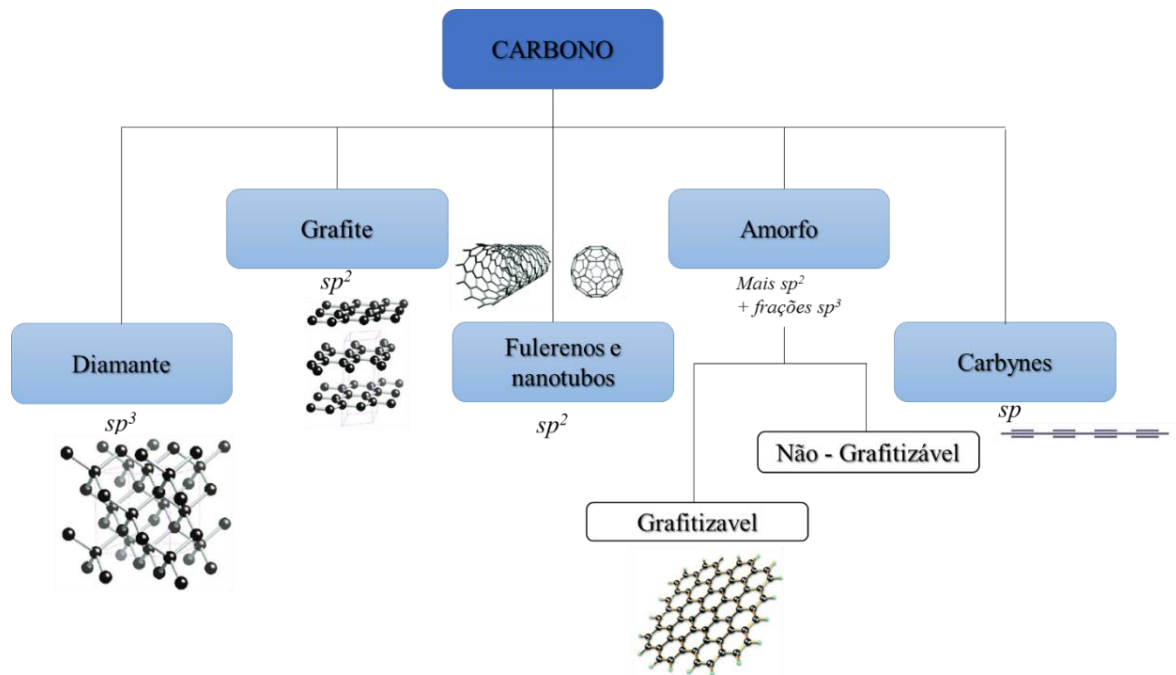
Fonte: Adaptado de GALTEC (2008).

### 3.5 CARBONO

Carbono é um elemento químico encontrado em abundância em todo o planeta, que pode existir em três diferentes hibridizações,  $sp^3$ ,  $sp^2$  e  $sp^1$ , dessa forma um mesmo elemento químico o carbono, tem a característica de formar substâncias simples diferentes com propriedades alotrópicas (Pierson, 1994; Robertson, 2002). Alótropos são compostos formados inteiramente de carbono com diferentes estruturas físicas, conhecidos como: diamante, grafite, fulerenos e nanotubos, e amorfos de carbono (Pastrana-Martínez, 2013).

A Figura 3 contém um desenho esquemático dos alótropos de carbono de acordo com as respectivas hibridizações. Os *carbynes* ou *carbines* compreendem as formas de carbono do tipo fuligem, o negro de fumo e outras, não especificadas nem compreendidas em outras posições (Pastrana-Martínez, 2013).

Figura 3 - Alótropos do elemento de Carbono.



Fonte: Adaptado de FALCÃO; WUDL (2007).

### 3.5.1 Grafite

Grafite é uma forma cristalina do carbono, que é um elemento químico presente em todos os seres vivos e em muitos materiais naturais, como o petróleo e o carvão mineral (Pastrana-Martínez, 2013). A grafite é considerado uma das formas mais estáveis e inertes do carbono, e é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais, como materiais refratários, lubrificantes, eletrodos, materiais estruturais, entre outros (Geim, 2009).

A seguir estão apresentadas algumas definições e características importantes do grafite (Pastrana-Martínez, 2013). Antes vale esclarecer que a palavra grafite precedida da letra “A” significa substantivo feminino nos dicionários, a grafite, e designa o mineral. Já precedida de letra “O” significa desenho ou rabisco feito em muros ou paredes (Pastrana-Martínez, 2013).

**Estrutura:** A estrutura do grafite consiste em camadas planas de átomos de carbono ligados covalentemente a três outros átomos de carbono em um arranjo

plano, e as camadas são mantidas unidas por interações fracas de Van der Waals (Pastrana-Martínez, 2013).

**Propriedades físicas:** A grafite é um material macio e quebradiço. Com baixa densidade e ponto de fusão relativamente alto. O mineral é um bom condutor térmico e elétrico, sendo utilizado em diversas aplicações que requerem alta condutividade.

**Lubrificação:** Uma das principais características do grafite é sua capacidade de lubrificação, pois as camadas lamelares do grafite deslizam facilmente sobre as outras, reduzindo o atrito entre as superfícies em contato (Geim, 2009).

**Resistencia química:** A grafite é resistente a muitos produtos químicos, incluindo ácidos, bases, solventes orgânicos e gases corrosivos, o que o torna um material adequado para muitas aplicações em ambientes químicos (Geim, 2009).

**Aplicações:** A grafite é amplamente utilizado em várias aplicações, como na produção de baterias, eletrodos de solda, refratários, materiais de carbono, lubrificantes, grafite expandido e muitos outros. Também é usado em eletrônica. Como componentes de circuitos impressos, revestimentos condutores e para produzir tinta para lápis (Geim, 2009).

### 3.5.2 Grafeno

#### História e evolução

A palavra grega *graphos* é a raiz da palavra gráfico e o sufixo *eno* é usado na nomenclatura de hidrocarbonetos. Ambos os *nerons* contêm uma rede hexagonal de aromáticos. Sua notável condutividade elétrica o torna uma ótima escolha. Além de substituir o silício pela microeletrônica, o candidato a substituição é o grafeno (Pei; Cheng, 2012).

Em 1947, o físico Philip R. Wallace descobriu e estudou os princípios do grafeno pela primeira vez. No entanto, sua pesquisa era limitada e não existia grafeno real em 1947. Os químicos alemães Ulrich H. Hofmann e Hanns-Peter B. Boehm, criaram o nome do composto em 1962. Eles combinaram as palavras "grafite" e "ene", criando a palavra grafeno. Atualmente, uma quantidade significativa de pesquisas sobre grafeno está sendo conduzida ao redor do mundo (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

Um dos propósitos principais sobre a descoberta e estudo do grafeno foi em fornecer o máximo de pesquisas e informações à comunidade científica. No entanto, em 2004 isso mudou graças a Konstantin Novoselov e Andre Geim, ambos da

Universidade de Manchester, na Inglaterra - que testaram o potencial do grafeno como substituto do transistor para o silício usado em semicondutores (Geim, 2009).

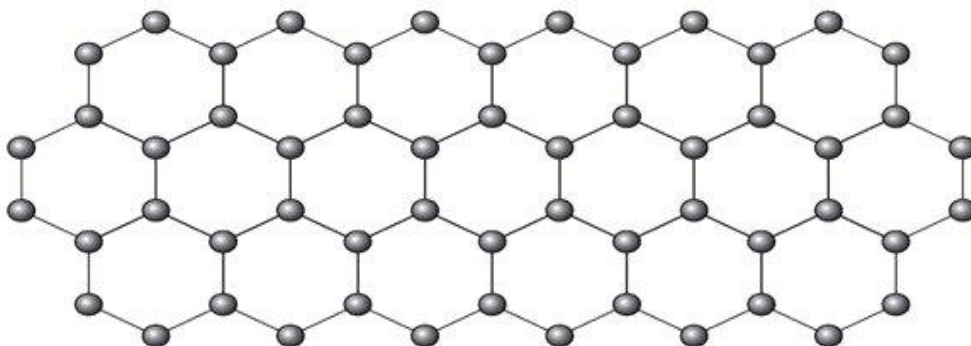
Maximizar a condutividade do grafeno melhorou ainda mais sua capacidade de transmitir sinais elétricos. Geim e Novoselov diminuíram a espessura do grafeno até atingir o tamanho atômico necessário. Mesmo após esse tratamento, o material manteve sua estrutura plana sem perder propriedades. Teste após teste provou as capacidades aparentemente infinitas dos transistores de grafeno. A exploração de seis anos levou os cientistas a ganharem o Prêmio Nobel de Física em 2010 por experimentos inovadores envolvendo o grafeno. Desde então, mais de 3.000 estudos adicionais foram publicados todos os anos explorando a substância (Pei; Cheng, 2012).

### **Características técnicas e estrutura atômica**

Os átomos de carbono ligam-se com qualidades  $S_2$  de ligação simples para formar configurações ideais. A palavra grafite é derivada das raízes gregas antigas graphitós, que significa lápis, porque se parece com uma mina de lápis. Uma monocamada de grafeno é uma forma isolada de grafite, que é considerada uma única camada atômica (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

Na figura 4 é possível verificar uma ilustração do hexágono gerado que forma o grafeno (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

*Figura 4 - Estrutura Hexagonal.*



Fonte: Batista (2022).

O grafeno é tão fino quanto um único átomo e 200 vezes mais forte que o aço. Também é elástico, transparente, resiste à corrosão líquida e conduz calor e

eletricidade melhor do que qualquer outro componente. Por exemplo ao empilhar 3 milhões de camadas de grafeno será atingido 1 milímetro de altura. Na prática, o grafeno é reconhecido como um material de alta durabilidade, leveza e resistência mecânica (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

O grafeno possui condutividade elétrica excepcional, excelentes propriedades físicas, como alta resistência mecânica e a corrosão. Suas propriedades químicas e eletrônicas vêm de sua alta estabilidade de ligação (Geim, 2009).

Os elementos físicos superlativos incluem condutividade térmica que supera o diamante - que é  $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$  bem como um módulo de elasticidade superior a  $1 \text{ Tpa}$  e resistência à fratura. Tem comprimento flexível e expansível até 20% do seu comprimento original (Geim, 2009).

A área de superfície do grafeno é de 2600 metros quadrados por capacidade de adsorção e dessorção de gás. Considerando capacidade por adsorção o cálculo para determinação da área superficial pode ser utilizado o método BET através de uma equação numa parte da isoterma de adsorção. Contamos também com transparência do grafeno é próxima do vidro e do monóxido de carbono, passando por ele com uma transparência de até 95% na luz. O grafeno tem potencial para uso em múltiplas áreas devido às suas propriedades e características (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

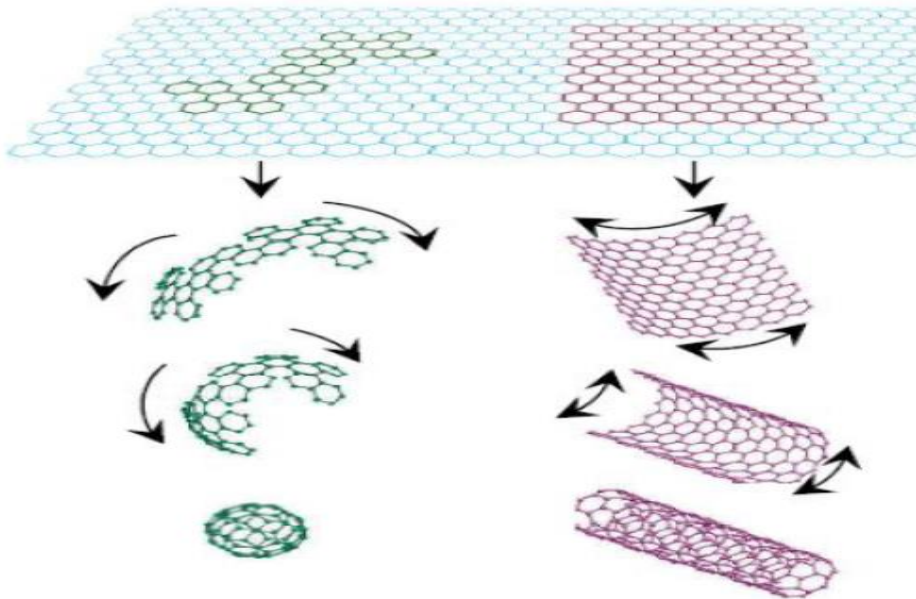
A capacidade de derivar grafeno vem do material de mesmo nome. As mós de laminação podem ser usadas para Nanotubos, como resultado, elas assumem outras dimensões, como comprimento. Derivado de fulerenos 1D ou envolventes, mostrados na figura 3 (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

Devido ao grafeno ser classificado como um material repelente à água, o evento inesperado referido no original refere-se ao fato de que a água não gruda no grafeno. A espessura de um átomo de grafeno, cerca de um bilionésimo de metro, explica por que o material funciona. As moléculas de água devem se encaixar extremamente perto da superfície do grafeno por serem muito finas (Ren; Cheng, 2013).

Embora o motivo varie, o efeito geralmente é causado pelas forças de Van der Waals, que têm um alcance de cerca de 3 nanômetros. A estrutura compacta do grafeno impede a passagem, previne a oxidação na superfície, permitindo um átomo nuclear, metais como cobre, ouro e silício sem ocorrerem alterações nas ligações moleculares (Pei; Cheng, 2012).

A figura 5 contém um desenho esquemático de Alótropos de Carbono obtidos a partir de conformações de folhas de grafeno. Criando-se nanotubos de carbono e folhas de grafeno.

*Figura 5 - Construção de materiais com outras dimensionalidades a partir de uma folha de grafeno.*



Fonte: Batista (2022).

### **Áreas de aplicação do Grafeno**

O uso de alótropos de carbono é encontrado em células solares, células de combustível e baterias de lítio. Eles são usados em próteses para substituição de olhos, mãos, membros e órgãos internos. Os alótropos de carbono também são utilizados para evitar a corrosão, e muitos materiais inibidores de corrosão, telas flexíveis de cristal líquido (LCD), fotodetectores e sensores químicos e biológicos (Geim, 2009).

As aplicações do grafeno na indústria de tecnologia, permitiu a criação de celulares futuristas flexíveis com designs semelhantes aos filmes de ficção científica. Esses telefones podem dobrar e se enrolar, tornando-os completamente transparentes e finos o suficiente para escrever. Eles podem até ser inseridos em um bolso e não se incomodam com sua operação (Pei; Cheng, 2012).

Celulares e notebooks atualmente possuem baterias não confiáveis que causam transtornos para seus usuários. Em 2011, um pesquisador da Northwestern University, nos EUA, implementou uma bateria em grafeno com carga que dura mais de uma semana e leva apenas 15 minutos para recarregar. Richard Kaner, da Universidade da Califórnia, criou uma bateria com as mesmas propriedades em fevereiro de 2013. E por último, as baterias para smartphones podem ser recarregadas em cinco e 10 segundos (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

Pesquisadores das universidades de Bath e Exeter, ambas no Reino Unido usaram interruptores ópticos feitos de grafeno para aumentar a velocidade de transmissão de dados em 100 vezes. Cientistas do Instituto de Tecnologia da Geórgia criaram uma antena feita com grafeno fino que pode transmitir 128 GB em 1 segundo a uma distância de 1 metro. Além disso, essas antenas podem transmitir 1 TB de dados a uma velocidade de 100 milhões de bits por segundo (Ren; Cheng, 2013).

Os avanços tecnológicos são necessários para produzir grafeno em massa; uma mudança necessária no cenário atual é descrita em estudo divulgado em abril de 2012. O Instituto de Tecnologia da Samsung na Coreia e a Universidade Sungkyunkwan na Coreia do Sul desenvolveram um método para produzir grafeno de alta qualidade a partir de pastilhas de silício, isso possibilitaria a produção de transistores de grafeno em grandes quantidades (Pei; Cheng, 2012).

Muitas disciplinas, como química, física e ciência dos materiais, envolvem tecnologia. Além disso, muitos aspectos da fabricação estão envolvidos nessas disciplinas. Ao discutir componentes microeletrônicos, como transistores, deve-se fazer referência a possibilidade de produção deles em grafeno num futuro não muito distante (Ren; Cheng, 2013).

A tabela 4 contém uma lista de aplicações para o grafeno, e elas precisam ser exploradas. As mais conhecidas atualmente são: construção civil, energia, telecomunicações, medicina e eletrônica:

*Tabela 4 - Áreas de aplicação do grafeno.*

<b>Água potável</b>	Membranas formadas por grafeno são capazes de dessalinizar e purificar a água do mar.
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	Filtros de grafeno são capazes de reduzir as emissões de CO <sub>2</sub> ao separar gases gerados por indústrias e comércios que serão rejeitados.
<b>Detecção de doenças</b>	Sensores biomédicos muito mais rápidos são feitos a base de grafeno e podem detectar doenças, vírus e outra toxinas.
<b>Construção civil</b>	Materiais de construção, como betão e alumínio, se tornam mais leves e resistentes com a adição de grafeno.
<b>Beleza</b>	Coloração de cabelo pela pulverização de grafeno, cuja duração seria em torno de 30 lavagens.
<b>Microdispositivos</b>	Chips ainda menores e mais resistentes devido à substituição do silício pelo grafeno.
<b>Energia</b>	Células solares têm melhor flexibilidade, mais transparência e diminuição dos custos de produção com o uso de grafeno.
<b>Eletrônicos</b>	Baterias com melhor e mais rápido armazenamento de energia podem recarregar em até 15 minutos.
<b>Mobilidade</b>	Bicicletas podem ter pneus mais firmes e quadros pesando 350 gramas com o uso de grafeno.

**Fonte:** Adaptado de BATISTA (2020)

### 3.6 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E NOMENCLATURAS INTERNACIONAIS

O condutor de cobre tem alta condutividade elétrica (58 MS/m a 20° C) e é amplamente utilizado em aplicações elétricas, em detrimento a relação favorável entre resistência mecânica e densidade de massa e resistividade, por outro lado o alumínio é um material condutor tecnicamente compatível e altamente competitivo em relação ao cobre, comumente usados na engenharia para transporte e distribuição de energia, tendo aplicação em redes de distribuição industrial, comercial e residencial, tendo a particularidade de aplicação para linhas aéreas de energia como Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR), (Balachandran *et al.*, 2016).

A demanda crescente por maior capacidade de transporte, distribuição e transmissão de energia de linhas elétricas é uma força motriz do desenvolvimento da engenharia de materiais condutores. Condições de funcionamento de condutores impõem requisitos adicionais sobre materiais condutores como características de resistência e fadiga, reologia e excelente resistência à corrosão. (Liu, *et al.*, 2016).

Quando são produzidas ligas para melhorar a condutividade elétrica, acaba-se limitando as características técnicas máximas dos metais puros propriamente ditos, ou seja, cobre puro e alumínio puro, para produzir condutores de energia, porém em detrimento a fatores como oxidação, corrosão e dureza mecânica obrigatoriamente devem existir a composição das ligas que demonstram alta resistência mecânica, corrosão e oxidação (Kuilla *et al.*, 2010).

A condutividade elétrica é uma propriedade microscópica dos materiais que corresponde ao inverso da resistividade ( $\rho$ ). Uma alta condutividade em um material indica grande capacidade de transportar cargas elétricas com facilidade, mediante a aplicação de uma diferença de potencial entre dois pontos (Kuilla *et al.*, 2010).

Considerando que a unidade de medida da condutividade elétrica medida no sistema internacional é exatamente o inverso da unidade de medida da resistividade ( $\Omega \cdot m$ ), sendo, portanto,  $1/\Omega \cdot m$  ou, ainda,  $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ . A condutividade elétrica também é escrita em termos de outra unidade de medida, conhecida como Siemens, cujo símbolo é S. Tal unidade é usada para representar uma grandeza definida pelo inverso da resistência elétrica (R): a condutância elétrica (G)." Uma outra unidade de medida é o IACS cuja sigla significa "*International Annealed Copper Standard*" traduzindo é Padrão Internacional de Cobre Recozido. Essa unidade de medida é frequentemente usada na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos.

A condutividade elétrica específica de 100% IACS corresponde a 58 MS/m (milhões de Siemens por metro) (Liu *et al.*, 2016).

A principal vantagem da utilização do % IACS sobre o MS/m é que a unidade % IACS implica que as medições foram feitas à temperatura de 20°C (293K ou 68°F) enquanto MS/m não especifica temperatura. Isto faz com que %IACS seja especialmente útil para comparar materiais e para conversão deve-se considerar que 100 %IACS é equivalente a 58 MS/m (Liu *et al.*, 2016).

### 3.7 CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO DO GRAFENO

Considerando que o grafeno é um material basicamente composto de carbono bidimensional, tem atraído grande interesse científico e interesse tecnológico devido às suas intrigantes propriedades físicas e enorme potencial para várias aplicações.

O grafeno tornou-se recentemente uma alternativa muito atraente como um novo tipo de “revestimento adicional” ao cobre e ao alumínio, permitindo a modificação de suas características elétricas e de trabalho. Onde é realizada a aplicação de uma camada de grafeno ao redor dos condutores de cobre ou alumínio, gerando uma camada que permite em teoria melhorar as características condutivas do material final (Alves, 2021).

A tabela 5 contém as informações técnicas comparativas entre os condutores de cobre, alumínio e grafeno referentes as principais características como pontos de fusão, densidade, condutividade elétrica, condutividade térmica, resistência tração, dentre outros.

Na tabela 5 pode-se verificar as características dos materiais, onde o grafeno obtém uma condutividade elétrica, cerca de 3 vezes maior que do alumínio e praticamente o dobro em relação ao cobre, além de outras características relevantes, como o ponto de fusão alto, condutividade térmica e uma alta mobilidade de elétrons

*Tabela 5 – Características técnicas Cobre x Alumínio x Grafeno.*

Parâmetros	Materiais tradicionais	Materiais tradicionais	Materiais modernos
	Cobre	Aluminio	Grafeno
Ponto de fusão (°C)	1083	660	3.851
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	8,8	2,76	1.1-1,5
Mobilidade dos eletrons (cm <sup>2</sup> *v <sup>-1</sup> * s <sup>-1</sup> )	40	1,2	15.000
Condutividade elétrica ( M*S/m)	58	36	100
Condutividade Termica ( W/m*K)	400	200	(4840 a 5300)
Resistência a tração ( M Pa)	260	6 -200	130.000
Coefficiente de temperatura da resistência (K <sup>-1</sup> )	3,9 * 10 <sup>-3</sup>	4 * 10 <sup>-3</sup>	
Modulo de Young ( G Pa)	110	70	1.000
Raio Atômico ( p m)	128	125	70
Parâmetro de Rede	63,5	404	142

Fonte: Adaptado de WANG *et al.* (2021).

Considerando a baixa solubilidade do carbono nos metais, o grafeno é usado principalmente como um aditivo composto. Um mecanismo de mudança de características elétricas dos materiais envolve a formação de ligações metal-carbono chamado Covetic (Kim; Abdala; Macozko, 2011).

Além disso, a resistência mecânica muito alta e o alto ponto de fusão do grafeno pode afetar positivamente as características do compósito, aumentando sua resistência a condições de operação, incluindo exposição à temperatura por longos períodos, este parâmetro está diretamente relacionado com a capacidade de condução de corrente dos condutores de energia (Kuilla *et al.*, 2010).

A síntese de grafeno com alumínio ou cobre propicia uma condição para obter novos materiais com características elétricas e funcionais anteriormente desconhecidas.

Há diferentes abordagens e trabalhos sobre o uso de diferentes métodos para desenvolver tais materiais que estão em andamento a seguir (Balachandran *et al.* 2016):

- a) Síntese química - Tipos Covéticos de uma mistura atômica (mistura por síntese de líquido metal com grafeno, sob condições de fundição apropriadas);
- b) Deposição eletroquímica de grafeno em elementos de Alumínio ou outro material;
- c) Fundir uma mistura de metal líquido com grafeno para uma forma que facilite processamento para fazer barras com as características exigidas (condutores de fundição contínua como material de entrada para a fabricação de barramentos blindados adicionais pode ser o produto do processo);
- d) Deposição de revestimentos monoatômicos de carbono (grafeno) usando o método CVD na superfície de barras de alumínio e seu posterior processamento plástico para formar barras com características exigidas;
- e) Pintura superficial nas barras condutoras de Alumínio;

### 3.8 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE GRAFENO

Existem vários métodos para obter grafeno. Seguem os mais conhecidos segundo Poh *et al.* (2012):

**Método de esfoliação mecânica;**

**Método de deposição química de vapor (CVD);**

**Método de redução química;**

**Método de eletrodeposição ou eletrólise;**

**Método Hammers;**

#### **Método de esfoliação mecânica**

Este método é baseado na separação de camadas de grafeno a partir de um bloco de grafite usando fita adesiva. A grafite é colocada em uma superfície plana e uma fita adesiva é pressionada firmemente contra ela. Quando a fita é removida, as camadas externas do grafite aderem a fita, permitindo a obtenção de camadas individuais de grafeno.

#### **Método de deposição química de vapor (CVD)**

Este método envolve a deposição de camadas de grafeno sobre um substrato através da vaporização de um precursor de carbono, como metano, a altas temperaturas. O processo é realizado em uma câmara a vácuo, onde o precursor é aquecido a altas temperaturas, formando assim uma camada de grafeno sobre o substrato.

#### **Método de redução química**

Neste método, o óxido de grafeno é reduzido quimicamente para produzir camadas de grafeno. O óxido de grafeno é produzido pela oxidação do grafeno em ácido nítrico ou perclórico, e em seguida, é reduzido quimicamente usando agentes redutores, como hidrazina, para produzir camadas de grafeno.

#### **Método de eletrodeposição**

Neste método, o grafeno é depositado em uma superfície condutora por meio de eletrólise. O processo envolve imersão de um substrato condutor em uma solução

contendo um precursor de carbono e a aplicação de uma corrente elétrica, que leva a deposição de camadas de grafeno sobre o substrato.

O grafeno, é um subproduto de outros processos e depois é purificado, porém, ainda é necessária a busca por meios que facilitem e reduzam os custos de produção para o grafeno, permitindo sua produção em larga escala e contribuindo para a popularização do material (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

A utilização do grafeno no mercado eletrônico e elétrico, são algumas das aplicações mais aguardadas pela indústria, permitindo contornar tanto a escassez de produtos como o cobre e o silício, como também a melhoria dos produtos fabricados com estes materiais, permitindo componentes eletrônicos menores e cabos elétricos mais leves e finos, sendo estes apenas alguns dos inúmeros benefícios que o grafeno trás para a indústria elétrica (Geim, 2009).

Para processar grandes quantidades de materiais, é difícil encontrar uma fonte com outros métodos de produção de grafeno, porém alguns deles foram criados. Uma delas é a Paraphrase, uma empresa chamada Offeman relatou excelentes rendimentos com técnicas de esfoliação química (1958).

Considerando a esfoliação química, são necessárias soluções com alto teor de ácido.

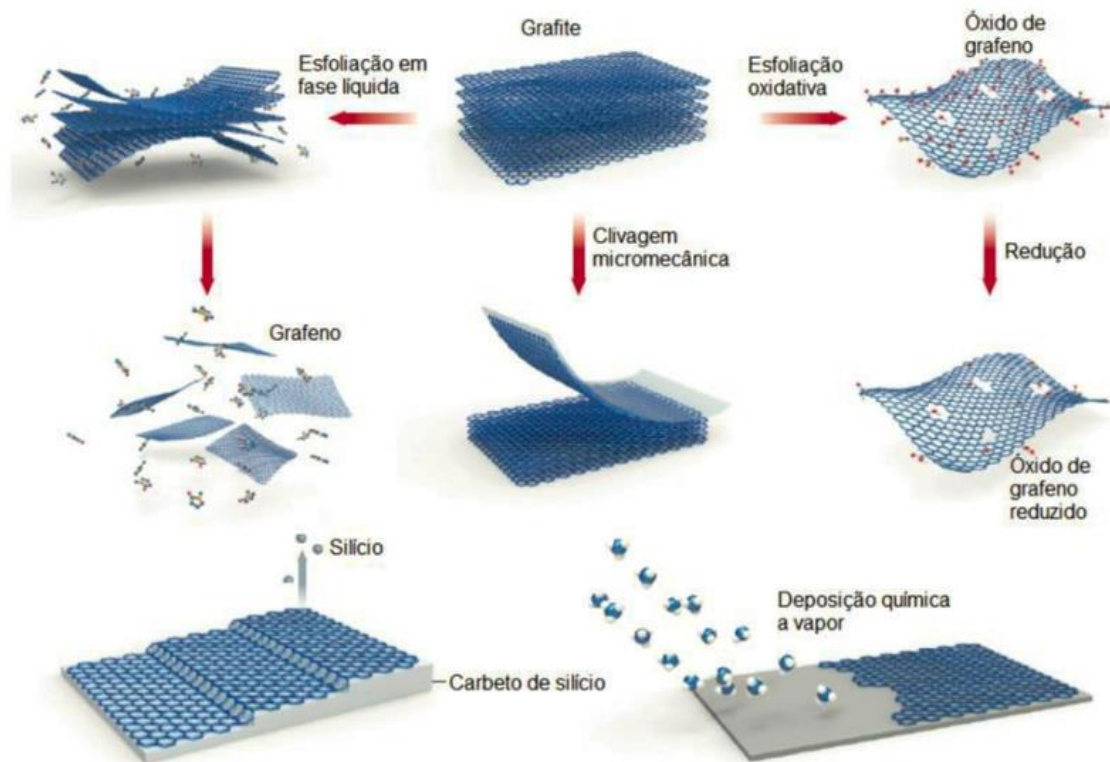
Durante o processo de esfoliação, é necessário o controle rigoroso da temperatura tanto do  $H_2SO_4$  quanto do  $H_3PO_4$ . O processo químico garante que a qualidade do grafeno final permaneça inalterada (Pei; Cheng, 2012).

A água limpa é necessária para a lavagem final para remover os produtos indesejados. As condições específicas do método dificultam sua execução novamente, este processo envolve a esfoliação química do material (Geim, 2009).

A figura 6 contém um desenho esquemático do processo de produção do grafeno por eletrólise. Onde pode ser visto que o processo é iniciado no ponto central pelas folhas de GRAFITE, podendo existir esfoliação oxidativa para obtenção do óxido de grafeno, bem como na continuidade deste processo sua minimização para óxido de grafeno reduzido.

Por outro lado, as folhas de grafeno podem ser esfoliadas em fase líquida para obtenção do grafeno. Podendo evoluir para aplicação ao silício e conseqüentemente aplicação em placas solares mais resistentes, com condutividade e eficiência térmica muito grande (Geim, 2009).

Figura 6 – Obtenção do grafeno por eletrólise.



Fonte: WANG *et al.* (2021).

### Método Hammers

Hammers e Hofman introduziram em 1958 o primeiro processo sintético para a criação de pinacolinhas. A mistura de grafite com nitrato de sódio, ácido sulfúrico e permanganato cria a substância grafite (Ren; Cheng, 2013).

No caso do grafeno se utiliza a oxidação do grafite a óxido de grafite (OG) subsequente da redução dela. Enquanto Staudenmaier e Hofman utilizam ácido sulfúrico somado a  $\text{KClO}_3$  e ácido nítrico em concentrações de 98% (fumegante) e 68% (concentrado) respectivamente. Já Hummers utiliza apenas o ácido sulfúrico e dois sais ( $\text{NaNO}_3$  E  $\text{KMnO}_4$ ), o que resultou em maior oxidação na ausência de  $\text{HNO}_3$  (Rei; Cheng, 2013). Quanto maior o grau de oxidação, menos grafite permanecerá na amostra e mais puro será o grafeno resultante. A redução é realizada por um choque térmico em um banho ultrassônico que pode chegar à temperatura de 1000 °C.

O método dos martelos ou Hammers oferece três benefícios principais. Em primeiro lugar, baseia-se no acrônimo OF potássio relacionado à paraxantina. Segundo, é um método analítico sensível que não usa muito potássio. E terceiro, pode ser usado para analisar uma variedade de compostos orgânicos (Ren; Cheng, 2013).

É possível liberar  $\text{ClO}_2$  em um curto espaço de tempo, além disso, as reações não envolvem liberações explosivas de  $\text{CO}_2$ . A solução é suplementada com clorato de potássio em vez de permanganato de potássio. A substituição do ácido nítrico por nitrato de sódio elimina a névoa ácida (Reiss; Hjelt; Ferrari, 2019).

Embora o cozimento a vapor tenha certas questões que precisam ser abordadas, como dificuldade ao lavar os íons residuais, como  $\text{Na}^+$  e  $\text{NO}_3^-$  com água, os usuários podem diminuir a gravidade da condição. Ânodos de grafeno reduzem gases tóxicos como óxido nítrico e dióxido de nitrogênio durante o processo (Geim, 2009).

O método Hammer é uma técnica usada para produzir grafeno de alta qualidade em grande escala. Essa técnica foi desenvolvida pelo cientista dinamarquês Peter Boggild e sua equipe na Universidade Técnica da Dinamarca

O processo envolve a deposição controlada de gás em uma superfície de cobre, seguida pela exposição a um plasma de hidrogênio para remover as impurezas e oxidações da superfície do cobre.

Em seguida, um aquecimento é aplicado para evaporar o cobre e deixar o grafeno na superfície.

O método Hammer é considerado um processo muito eficiente, produzindo grafeno com alta pureza e poucas impurezas.

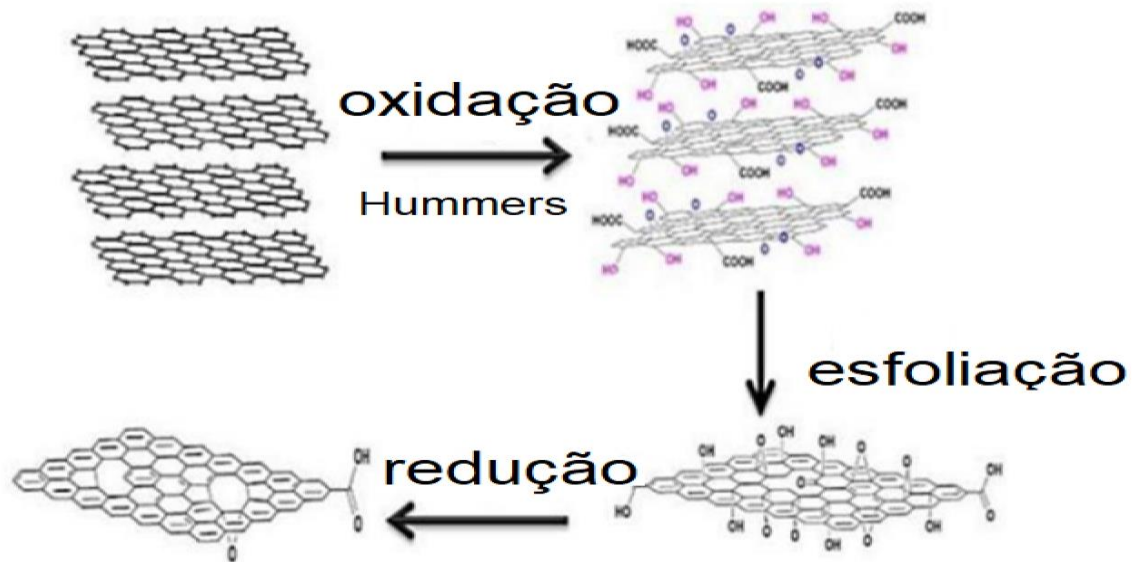
É também escalável para produzir grandes quantidades de grafeno em uma única etapa. Além disso, o grafeno produzido pelo método Hammer é muito uniforme em tamanho e forma, tornando-o ideal para aplicações eletrônicas e de nanotecnologia.

No entanto, embora o método Hammer seja uma técnica promissora para produzir grafeno de alta qualidade em grande escala, ainda há desafios a serem superados para tornar esse processo mais comercialmente viável.

O custo dos materiais usados no processo e o tempo necessário para produzir o grafeno ainda são obstáculos importantes para a adoção em larga escala do método Hammer.

A figura 7 contém um esquemático demonstrando o método de Hummer nas folhas de carbono, tendo a oxidação como início do processo, a esfoliação e a redução na finalização do processo.

Figura 7 - Método Hummers.



Fonte: REISS; HJELT; FERRARI (2019).

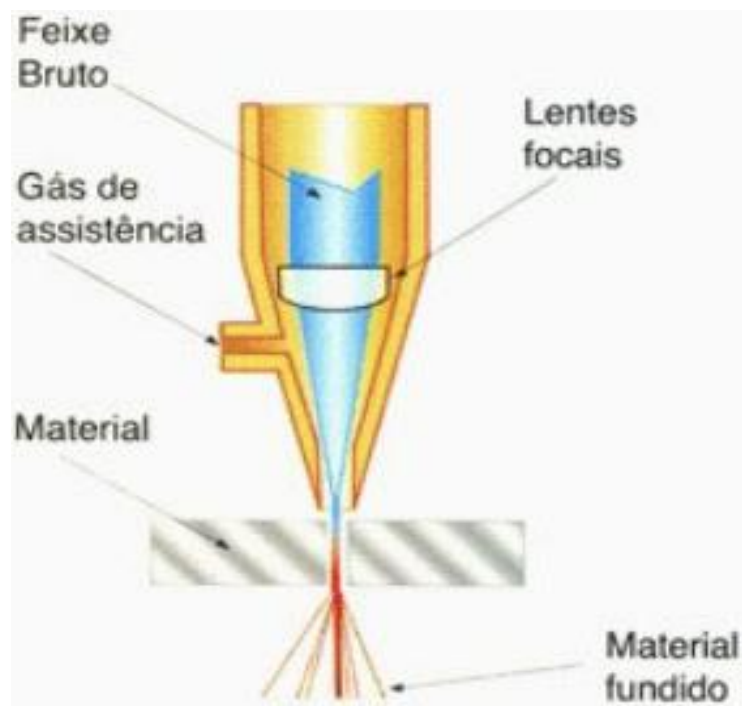
## 4. TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO DOS ALÓTROPOS DE CARBONO

### 4.1 LASER CLADDING

O Laser Cladding é um processo de revestimento por fusão ou sinterização, onde o feixe do laser é utilizado para fundir ou sintetizar o material de liga no substrato. Um tipo bem comum é utilizar como matéria-prima o pó do metal de liga, que é depositado no substrato como uma camada fundida. Nesse caso uma pequena parte do substrato é fundida (Dowden, 2009). O pó é utilizado porque ele é mais facilmente fundido do que se fosse utilizado, por exemplo, um arame. Isso ocorre por causa da alta energia livre da superfície dos pós.

A figura 8 contém esquemático demonstrando processo de cladding utilizado com feixe de laser e gás para resfriamento da aplicação para fusão superficial dos materiais

*Figura 8 – Esquema do processo Laser Cladding.*



Fonte: Adaptado de WANG *et al.* (2021).

Os principais parâmetros do processo *laser cladding*, são: densidade da potência do laser, velocidade do deslocamento do feixe do laser sobre o substrato e a espessura da camada de pó. Pois, esses três fatores alteram a microestrutura do revestimento formado e com o controle desses três fatores fica mais fácil a automação do processo. Durante a irradiação do laser, é utilizado um gás de proteção, gás argônio, para não ocorrer a oxidação do substrato ou do pó revestido (Dowden, 2009).

Dependendo das propriedades que se deseja obter escolhe-se a liga que vai ser utilizada, sendo que as propriedades mais comuns são condutividade, resistência à corrosão, oxidação e desgaste (Dowden, 2009).

Então exemplos de ligas utilizadas são cobalto, ferro e níquel, também carbeto de tungstênio, ligas de titânio, de alumínio e zircônia (Viana, 2015).

Conforme o tamanho da área que se deseja, da espessura da camada de revestimento e da complexidade da peça escolhe-se o tipo de laser. Para grandes áreas, grande espessura de camada e peças regulares geralmente é utilizado o laser de CO<sub>2</sub>. O Laser de fibra é mais utilizado para peças complexas e para revestimentos com menos de 1 mm de espessura (Ion, 2005).

A potência utilizada no processo é um fator muito importante, porque caso se utilize uma baixa potência, o pó pode não fundir ou sinterizar bem e caso se utilize muita potência resulta em uma maior área fundida do substrato, gerando uma diluição indesejada do pó com o metal de base, além de gerar grandes tensões no material, que podem criar trincas (Ion, 2005). Os principais desafios do Laser Cladding são ter um processo com menor distorção na peça possível e utilizar menos matéria-prima, maior área recoberta possível e forte ligação do revestimento com o substrato (ION, 2005).

#### 4.2 APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO DE GRAFENO NAS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE PINTURA

O método de pintura de grafeno sobre barras condutoras de alumínio envolve a aplicação de uma camada fina de grafeno na superfície das barras usando técnicas de deposição química a vapor (CVD) ou deposição a partir de solução, a seguir estão os passos gerais para a aplicação do grafeno (Magnan; Ferreira, 2010).

Preparação da superfície da barra: A superfície da barra condutora de alumínio deve ser preparada adequadamente para garantir uma boa adesão da camada de grafeno. A superfície deve ser limpa e livre de quaisquer impurezas.

1. Preparação da superfície da barra: A superfície da barra condutora de alumínio deve ser preparada adequadamente para garantir uma boa adesão da camada de grafeno. A superfície deve ser limpa e livre de quaisquer impurezas
2. Preparação da solução de grafeno: A solução de grafeno é preparada a partir da dispersão do grafeno em um solvente adequado, como água ou etanol.
3. Aplicação da solução de grafeno: A solução de grafeno é então aplicada na superfície da barra usando técnicas de pulverização, imersão ou deposição por gotículas.
4. Secagem: A barra revestida é então deixada secar ao ar livre ou em um ambiente de vácuo para remover o solvente e deixar aparente a camada de grafeno
5. Tratamento térmico: O revestimento de grafeno pode ser submetido a um tratamento térmico a uma temperatura adequada para melhorar a aderência da camada de grafeno na superfície da barra e melhorar as propriedades elétricas do revestimento

Os processos já descritos para a produção de barras condutoras de alumínio com propriedades elétricas aprimoradas. No entanto, é importante lembrar que a aplicação de grafeno, trata-se de uma inovação deste trabalho e as condições exatas de produção podem variar dependendo do tipo de grafeno usado, solvente e outras variáveis experimentais.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DOS BARRAMENTOS BLINDADOS E AS SUPERFÍCIES A SEREM APLICADAS

#### 5.1 BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO

As barras de alumínio utilizadas neste trabalho são liga Alumínio 6101 tendo originalmente condutividade IACS de 53 a 59%. Barras foram devidamente adquiridas no mercado na empresa ALUMAX, tendo composição já devidamente descrita neste trabalho contendo aproximadamente Si0,7%, Fe0,5%, Cu0,1%, Mn0,03%, Mg0,8%, Cr0,03%, Zn0,1%, outros 0,03%.

#### 5.2 GRAFITE

O pó de grafite foi disponibilizado pelo laboratório IEAv CTA ITA SJC, sendo composto de partículas extremamente pequenas, com diâmetros na faixa de nanômetros. É utilizado em revestimentos antiestáticos, como catalisador em reações químicas e em materiais compósitos para melhorar sua resistência mecânica e condutividade elétrica

#### 5.3 GRAFENO

Foi disponibilizado o pó de grafeno pelo IP&D da Univap sob lote PL08 na quantidade de 100 gramas.

#### 5.4 DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE

Medidor de condutividade elétrica para metais não ferrosos,  
modelo DC -11M, marca ZAPPI

*Figura 9 – Medidor de condutividade elétrica modelo DC-11M.*



Fonte: ZAPPI ENGENHARIA (2020).

- Precisão: +- 1%.
- Faixa de medição: 5 a 110% IACS.
- Repetibilidade: 0.1 % IACS.
- Resolução: 0.1 % IACS.
- Frequência de operação 60KHZ.
- Espessura mínima da amostra a medir:
  - 0,8 mm para cobre.
  - 1,0 mm para alumínio.
  - 2,5 mm para chumbo.
- Diâmetro mínimo de medição: 10 mm.
- Temperatura de operação: 12 a 35 °C

A calibração do equipamento é feita mediante os três padrões de condutividades que acompanham o instrumento, garantindo exatidão e repetibilidade nos resultados. Podem ser fornecidos padrões de Bronze, Latão, diversas ligas de Alumínio, Cobre

Fosforoso e Cobre Eletrolítico conforme a necessidade do usuário (Zappi Engenharia, 2020).

## 5.5 MÉTODOS DE APLICAÇÃO DO GRAFITE E DO GRAFENO SOBRE AS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO

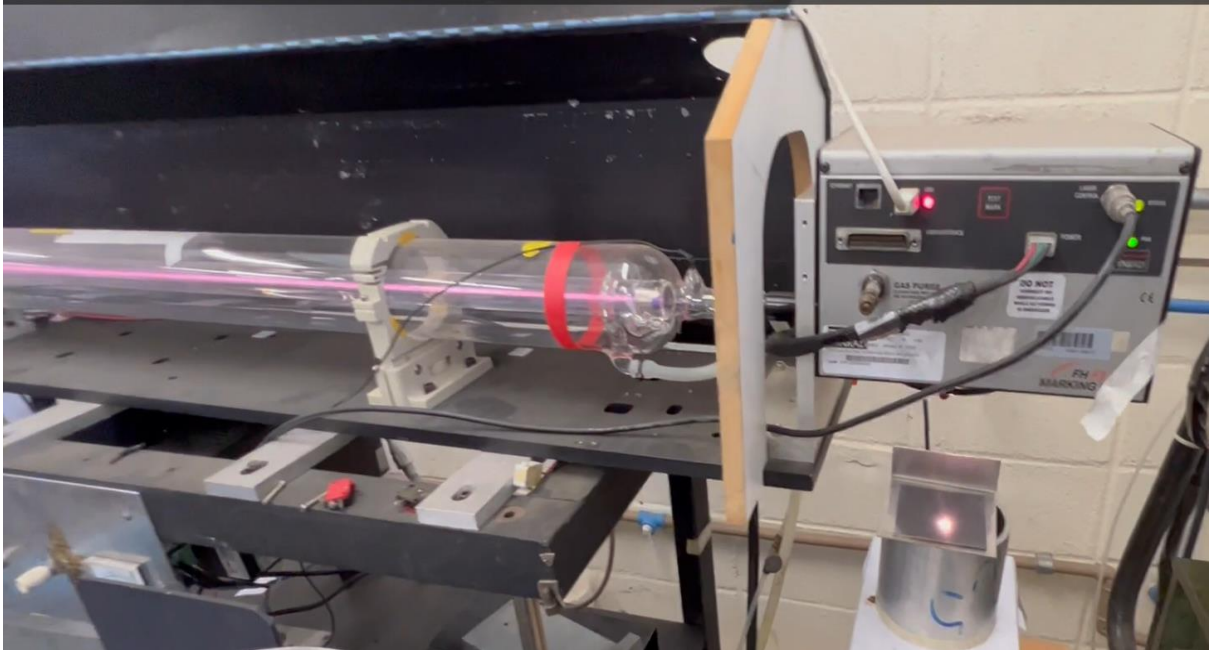
### 5.5.1 Deposição do grafite via Laser Cladding em amostra de barras de alumínio

As barras de Alumínio Liga 6101 pura foram revestidas de grafite através do processo de Laser Cladding primeiramente com grafite pura, porém, posteriormente a grafite foi ancorada na superfície através do processo de LASER CLADDING no laboratório de fotônica do IEAv CTA – SJC aplicação de grafite foi ancorada na superfície através do processo de LASER CLADDING, utilizando-se equipamento FH FLYER MARKING HEAD.

As barras de Alumínio foram recobertas por grafite através do método de laser cladding, gerando 6 amostras com diversas resoluções, velocidades e intensidades do laser.

A figura 10 contém fotografia do laser, modelo FH FLYER MARKING HEAD no Laboratório de Fotônica do IEAv do CTA ITA.

Figura 10 - Laser Cladding FH FLYER MARKING HEAD.



Fonte: Laboratório IEAv CTA ITA (2022).

### 5.5.2 Deposição de solução grafeno através de pintura em amostra de barras de alumínio Liga 6101.

A figura 11 contém fotografia das barras de alumínio do tipo 6101 nas dimensões (300x80x6) mm é possível observar que as barras de alumínio passaram por um processo de tratamento para limpeza superficial e retirada de impurezas, com o intuito de facilitar a aplicação do grafeno.

*Figura 11- Barras de alumínio antes da deposição da solução de grafeno antes do tratamento.*



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

A figura 12 contém fotografia das barras de alumínio do tipo 6101 nas dimensões (300x80x6) mm já recobertas com o grafeno e prontas para serem testadas no que tangem a condutividade elétrica.

*Figura 12 – Barramento após o tratamento com grafeno.*



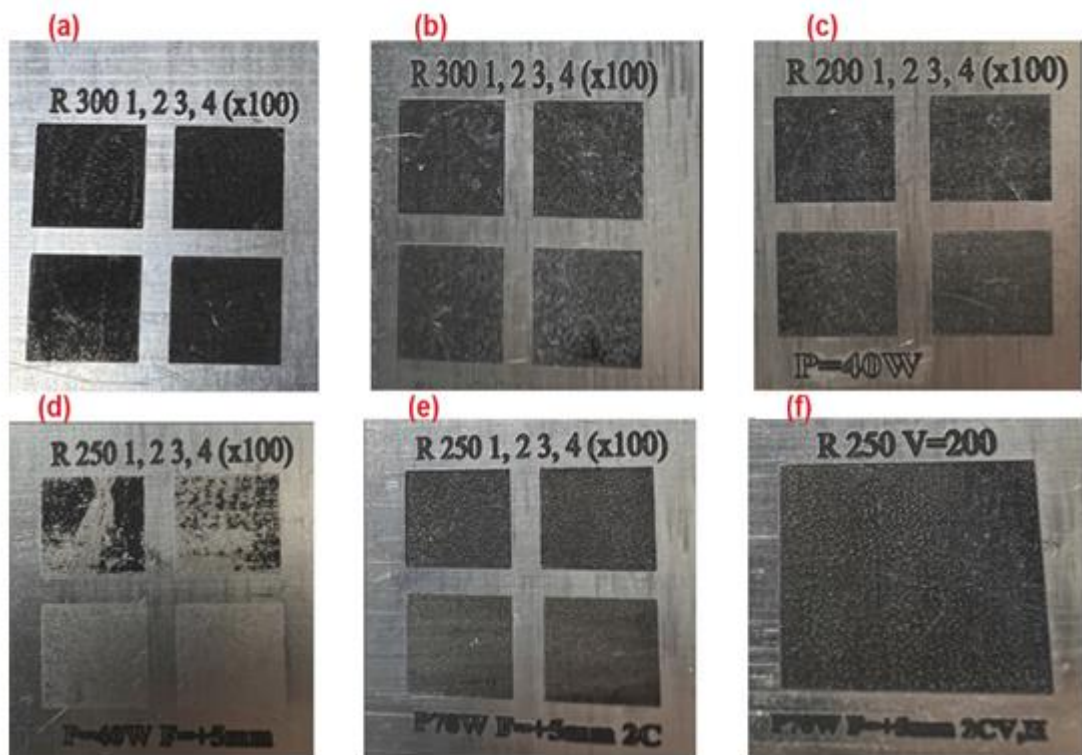
Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 RESULTADOS DA DEPOSIÇÃO DE GRAFITE NA SUPERFÍCIE DAS BARRAS DE ALUMÍNIO

Diante da realização do processo de laser cladding para a deposição de grafite sobre as barras de alumínio, seguem fatores que foram considerados durante os testes realizados. A Figura 13 Contêm 6 fotografias de preparação dos revestimentos com grafite tratados com diferentes parâmetros de laser Cladding na liga de alumínio 6101 pura. A letra “R” significa resolução de linhas de deposição do Laser, os números 1,2,3 e 4, seriam as velocidades do feixe por múltiplos de 100, sendo 1 x 100, 2 x 100, 3 x 100 e 4 x 100 A. Quanto a potência “P” potência utilizada variou entre 40 e 70 Watts

*Figura 13 – Amostras de alumínio revestidos com grafite.*



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

A tabela 6 contém parâmetros adquiridos de 6 (seis) diferentes amostras de barras de alumínio revestidas de grafite.

Onde os principais parâmetros foram:

- (R) resolução de linhas de deposição laser;
- (S) Sobreposição de aplicação das linhas, diretamente ligados a definição da aplicação;
- (V) Velocidade de percurso do Laser;
- (P) Potência de ajuste do Laser;
- (d) Ajuste do diâmetro do feixe do laser, de acordo com o equipamento que está sendo utilizado;

*Tabela 6 – Resultados dos parâmetros de aplicação do laser sobre as barras de Alumínio.*

Parâmetros	R ( Resolucao) linhas x pol	sobreposicao	V ( Velocidade)	P( Potencia)	d (diametro feixe)
Unidade	(Linhas x Pol ) mm	%	mm/s	Watts	mm
Figuras					
13(a)	25,4 /300 =0,084	0,084/0,3 = 0,28 = 28%	100 / 200 /300 /400	40	0,2-0,3
13(b)	25,4 /300 =0,084	0,084/0,3 = 0,28 = 28%	100 / 200 /300 /400	50	0,2-0,3
13(c)	25,4 /200 =0,127	0,127/ 0,2= 0,63 = 63 %	100 / 200 /300 /400	40	0,2-0,3
13(d)	25,4 /250 =0,101	0,101/0,25 =0,40 = 40%	100 / 200 /300 /400	40	0,2-0,3
13(e)	25,4 /250 =0,101	0,101/0,25 =0,40 = 40%	100 / 200 /300 /400	70	0,2-0,3
13(f)	25,4 /250 =0,101	0,101/0,25 =0,40 = 40%	200	70	0,2-0,3

*Fonte: Produzido pelo Autor (2022).*

A figura 14 contém equipamento de medição de condutividade IACs modelo DC -11M, marca ZAPPI, realizando as medições de condutividade conforme descritas a seguir.

*Figura 14 - Medição de condutividade elétrica das barras revestidas com grafite.*



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

A pintura de grafite foi realizada antes do processo de laser cladding, por pistola de pintura e após, a pintura com grafite, e a barra de alumínio foi testada em seu estado da arte como Liga 6101, tendo sua condutividade em torno de 50,7 IACS.

Foi realizada medição após aplicação do grafite nas barras e obteve-se resultado de 50,8 IACS. Este resultado se mantém dentro da incerteza de medição do equipamento em torno de  $\pm 5\%$ .

## 6.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE SOLUÇÃO DE GRAFENO NAS BARRAS CONDUTORAS DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DE PINTURA

Considerando as mesmas dimensões das barras condutoras de alumínio utilizadas para os experimentos com Grafite (300x80x6) mm foram realizados revestimentos de grafeno preparados com uma mistura de álcool e carboximetilcelulose (CMC) aplicados com solução aquosa sob a superfície das barras de alumínio. Após aplicação o material foi deixado em estufa para secar sem que ocorresse contaminação por poeira ou partículas do ambiente.

A figura 15 contém três fotografias dos materiais e ingredientes utilizados para a aplicação do grafeno nas barras de alumínio, realizando a preparação do material na quantidade necessária para a realização do experimento. Com 64,5 gramas de álcool etílico 15 (a), 15 gramas de Grafeno em pó 15 (b) e (c)

Figura 15 – Insumos utilizados para aplicação superficial do grafeno.



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

A figura 16 contém uma fotografia da medição de condutividade elétrica na barra de Alumínio liga 6101 com revestimento de Grafeno. Pode ser visto na tabela 7 a variação da medição de condutividade com valores de 46,95 a 53,33 IACS, sendo questão variação pode ser inerente a presença de oxidação durante o processo de laser cladding pelo fato do processo ser em atmosfera ambiente, podendo ser melhorado com pressão contínua de gás inerte.

*Tabela 7 – Resultados dos parâmetros das medições de condutividade elétrica expressos em IACS e (M\*S/m).*

Parâmetros	Condutividade (IACS)	Condutividade elétrica (M*S/m)
16(a)	53,33	30,93
16(b)	51,78	30,03
16(c)	46,95	27,23
16(d)	50,08	29,04

Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

*Figura 16 – Exemplo de medição de condutividade elétrica das barras revestidas com grafeno.*



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

### 6.3 RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE CORRENTE NOMINAL, DE ACORDO COM A NORMA DE BARRAMENTOS BLINDADOS ABNT NBR IEC 61.439-6

Considerando a tecnologia de condutores de energia conhecida como barramentos blindados conforme já descrito anteriormente neste trabalho, com o intuito de explorar complementarmente as propriedades do grafeno, foram realizados

ensaios de elevação de temperatura como ensaios complementares visando identificar se através destes testes possam resultar em comparativo às medições de condutividade elétrica já descritas neste trabalho.

O modelo de barramentos blindado utilizado nesta etapa do trabalho foi o modelo “Sandwich type” ou “Compacto” grau de proteção IP-55, justamente por ser um modelo com características de grande eficiência no que tange as perdas elétricas, bem como reatância indutiva e campo magnético induzido na carcaça praticamente nulos (Produzido pelo Autor, 2022).

A figura 17 contém uma fotografia do arranjo físico de ensaio de elevação de temperatura na corrente nominal, de acordo com Norma ABNT NBR IEC 61.439-6. Podem ser vistos 2 corpos de prova de (3.000 x 80 x 6) mm cada um, unidos por uma peça central denominada monobloco, e alimentação de entrada denominada “flange de alimentação”

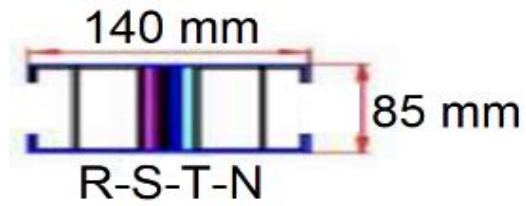
*Figura 17 – Arranjo físico do experimento.*



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

A figura 18 contém um desenho esquemático da vista interna das fases das barras de alumínio: R-S-T-N, pode-se observar complementarmente as dimensões externas deles.

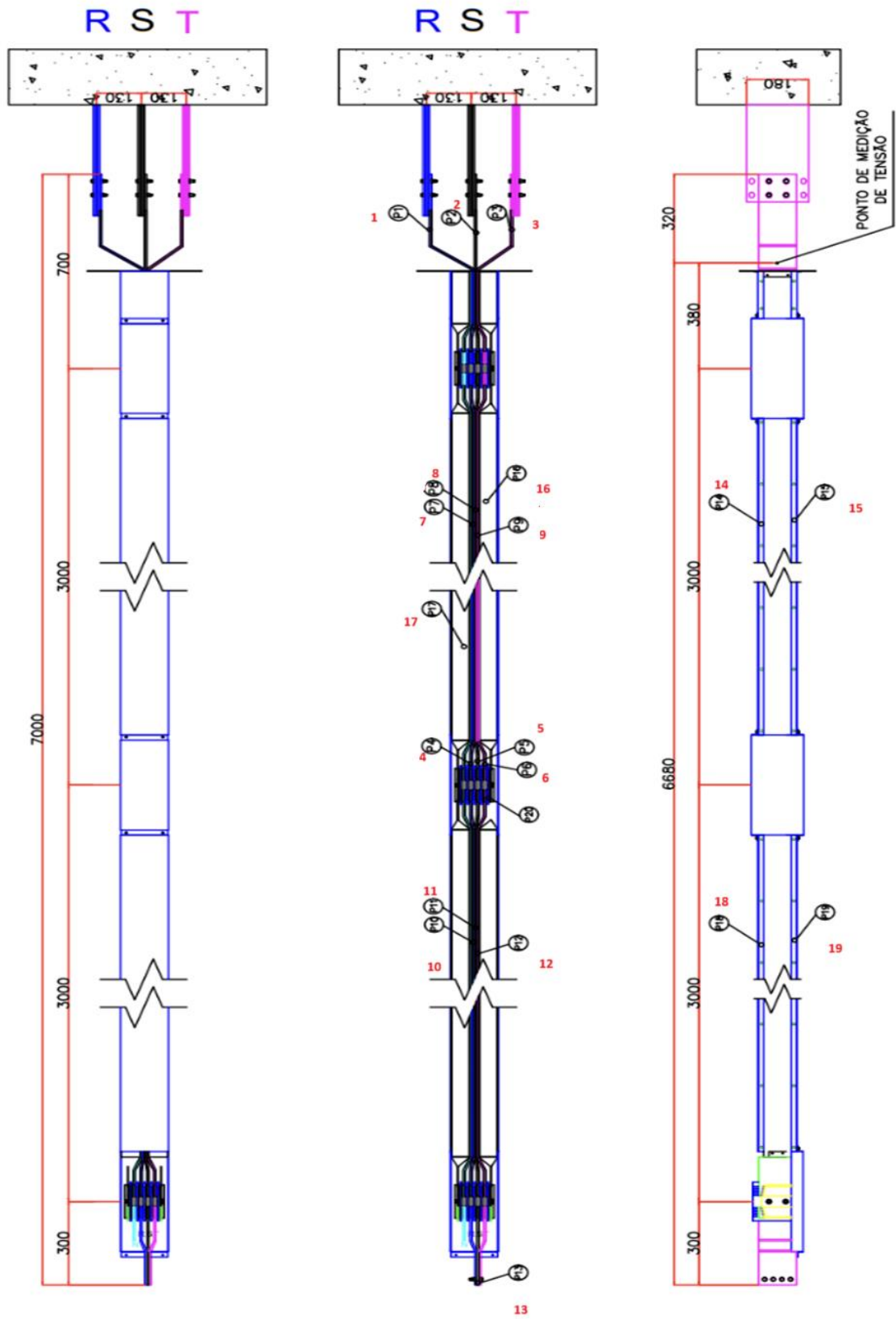
*Figura 18 - Dimensões Barramento blindado de 1000 A*



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

A figura 19 contém um desenho esquemático do arranjo físico de ensaio de elevação de temperatura conforme norma ABNT NBR IEC 61.439-6, sendo exigido um comprimento total do corpo de prova com dimensões com comprimento mínimo de 6.000 mm, portanto testes realizados com dimensões (7.000 x 80 x 6) mm. Tendo alimentação de energia devidamente identificado o lado da fonte como R-S-T respectivamente. (Produzido pelo Autor, 2022).

Figura 19- Desenho do arranjo físico de ensaio de elevação de temperatura.



Fonte: Produzido pelo Autor (2022).

De acordo com norma ABNT NBR IEC 61.439-1 Tabela 6, os limites de elevação de temperatura para superfícies metálicas em uso normal, mas que não necessitam ser tocadas durante operação de funcionamento podem ter a seguinte temperatura na parte externa dos barramentos blindados (  $35^{\circ}\text{C}$  (limite de temperatura ambiente) +  $30^{\circ}\text{C}$  (superfícies metálicas) +  $25^{\circ}\text{C}$  (superfície que não necessita, ser tocadas em operação normal) ), totalizando temperatura máxima de  $90^{\circ}\text{C}$ , como pode ser visto na tabela 8 pode-se constatar os resultados de um equipamento bem dimensionado, contudo visando maximizar a dissipação térmica e condutividade elétrica estaremos revestindo as barras condutoras de alumínio com grafeno como revestimento de superfície, visando melhoria da condutividade elétrica e condutividade térmica.

A tabela 8 contém os resultados das temperaturas na realização dos testes de elevação de temperatura percorrendo a corrente nominal de 1.000 A nas barras condutoras de alumínio liga 6101 com dimensões (7.000 x 80 x 6) mm com revestimento superficial contra corrosão galvânica e oxidação, conforme figura 2. Estes ensaios são realizados com a finalidade de projetar condutores de energia em alumínio para terem uma corrente nominal próximo aos limites de densidade de corrente máximos permitidos para o condutor de alumínio especificamente. Modelo do barramento blindado “Compacto” grau de proteção IP-55 e corrente nominal de 1.000 A.

*Tabela 8 – Resultados dos ensaios de elevação de temperatura nos barramentos blindados sob liga 6101 com revestimento superficial contra corrosão galvânica e oxidação, conforme Figura 2.*

<b>Verificação em 100% de carga:</b>											
<b>Corrente de ensaio CMAX: 1.000 A / Duração do ensaio até estabilização: 7 horas.</b>											
<b>Ponto de medição:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Temperatura de estabilização:</b>	44,2°C	41,9°C	40,9°C	73,4°C	76,2°C	85,7°C	86,2°C	81,1°C	70,5°C	81,7°C	88,3°C
<b>Ponto de medição:</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>Temperatura de estabilização:</b>	79,0°C	61,3°C	56,9°C	58,3°C	59,2°C	66,3°C	59,5°C	55,0°C	67,2°C	26,0°C	26,0°C
<b>Local de medição:</b>	<b>de</b>	<b>Especificado máximo)</b>	<b>(<math>\Delta T</math>)</b>	<b>Temperatura média (°C)</b>							
				<b>Estabilização:</b>				<b><math>\Delta T</math></b>			
Ambiente		---		26,00°C				---			
Conexão de entrada		Não Fornecido		42,33°C				16,33°C			
Emenda central				78,43°C				52,43°C			
Barra central 1ºtrecho				79,26°C				53,26°C			
Barra central, 2ºtrecho				83,00°C				57,00°C			
Involucro, 1ºtrecho		55		60,17°C				34,17°C			
Involucro, 2ºtrecho		55		57,25°C				31,25°C			

Fonte: Ensaio elevação temperatura Laboratório ITEN – SP, março (2022).

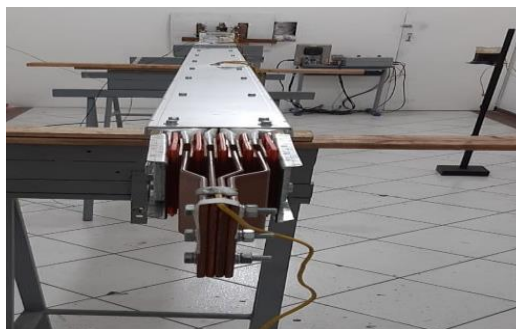
A tabela 8 contém os resultados das temperaturas na realização dos testes de elevação de temperatura percorrendo a corrente nominal de 1.000 A nas barras condutoras de alumínio liga 6101 com dimensões (7.000 x 80 x 6) mm com revestimento de pintura de grafeno. Modelo do barramento blindado “Compacto” grau de proteção IP-55 e corrente nominal de 1.000 A.

*Tabela 9 – Resultados dos ensaios de elevação de temperatura nos barramentos blindados com revestimento superficial através de pintura de grafeno.*

<b>Verificação em 100% de carga:</b>											
<b>Corrente de ensaio CMAX: 1.000 A / Duração do ensaio até estabilização: 7 horas.</b>											
Ponto de medição:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatura de estabilização:	39,63°C	37,14°C	36,53°C	67,79°C	70,50°C	79,72°C	80,28°C	75,40°C	65,05°C	75,82°C	83,10°C
Ponto de medição:	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Temperatura de estabilização:	73,26°C	56,31°C	51,93°C	53,22°C	54,07°C	60,89°C	54,35°C	50,07°C	61,85°C	23,00°C	23,00°C
Local de medição:	de	Especificado (máximo)	( $\Delta T$ )	Temperatura média (°C)							
				Estabilização:				$\Delta T$			
Ambiente		---		23,00°C				---			
Conexão de entrada		Não Fornecido		37,85°C				14,85°C			
Emenda central				71,66°C				48,66°C			
Barra central 1ºtrecho				73,36°C				50,36°C			
Barra central, 2ºtrecho				76,98°C				53,98°C			
Involucro, 1ºtrecho			55		55,13°C				32,13°C		
Involucro, 2ºtrecho		55		52,19°C				29,19°C			

Fonte: Ensaio elevação temperatura laboratório ITEN – SP, Abril (2023).

*Figura 20 - Desenho do arranjo físico de ensaio de elevação de temperatura com barras de alumínio com revestimento em grafeno, porém involucro em chapa de aço galvanizado sem revestimento.*



Fonte: Ensaio elevação temperatura Laboratório ITEN – SP, Abril (2023).

## 7 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou os tipos de materiais condutores e suas possíveis ligas, bem como a aplicação de grafite e grafeno na superfície das barras condutoras de alumínio liga 6101, para tanto utilizamos inicialmente barras de alumínio com dimensões de (300x80x6) mm para realizar deposição de grafite através de métodos de *laser cladding*, posteriormente foi realizada medição de condutividade onde pode-se constatar a variação de 50,7 IACS para 50,8 IACS, obtendo-se desta forma um resultado com variação de menos de 0,1%.

Ressaltando que o medidor de condutividade possui calibração para medir materiais ferrosos condutores, como ouro, cobre e alumínio.

Entendendo que equipamentos existentes na atualidade não conseguem medir com precisão a superfície opaca e de coloração acinzentada após a deposição do grafite através dos métodos de *laser cladding*, realizamos ensaios aplicando pintura de solução de grafeno no mesmo padrão de barras condutoras de liga 6101.

Sendo assim, utilizamos pó de grafeno, que através da criação de solução líquida permitiu a pintura superficial das barras condutoras de alumínio liga 6101 com as mesmas medidas de (300x 80x6) mm. De igual forma foram realizados devidos testes de condutividade com o intuito de entender sobre a evolução da condutividade delas. Para as barras de alumínio com revestimento superficial contra corrosão galvânica e oxidação, conforme Figura 2. Obteve-se resultado de 53,3 IACS, em seguida após aplicação da pintura de grafeno na superfície das barras obtivemos resultados de condutividade elétrica de 46,95 IACS (barra 1) e 50,08 IACS (barra 2) e respectivas velocidades no material de 27,23 e 29,04 MS/m.

Considerando os procedimentos realizados no revestimento superficial do grafeno pode ter ocorrido oxidação antes da pintura de solução de grafeno, contribuindo para um resultado com índice de confiabilidade baixo.

Quanto as características técnicas dos atuais equipamentos de medição de condutividade elétrica, possuem grande incerteza nas medições realizadas, principalmente pelo fato de não existir blocos de calibração para superfície de grafeno, nem grafite, resultando em valores de condutividade comparáveis as ligas de alumínio pura, no estado da arte.

Ao final deste processo conjectura-se a eficiência das medições de condutividade através de um aparelho de medição que depende de referências de superfícies reflexivas como o Cobre e Alumínio. Talvez o fato de ter uma superfície escurecida e nenhum equipamento conhecido no mercado poderia medir acima de 58 MS/m e nem acima de 100% IACS realmente nos leva a reposicionar a análise de condutividade de corrente elétrica para outras possíveis formas de analisar seus resultados, pois as barras de alumínio nem mesmo altamente impregnadas através da aplicação de grafite pelo processo de Laser Cladding ou pintura de solução de grafeno na superfície das barras tenham o resultado correto no que se refere a condutividade propriamente dita.

Buscando outras formas de obter resultados com a aplicação do grafeno na superfície das barras de alumínio e entender se condutividade elétrica e térmica seriam otimizadas pela aplicação do grafeno na superfície das barras de alumínio foram realizados ensaios de ensaio de elevação de temperatura, que consiste basicamente em percorrer a corrente nominal para o qual as barras de alumínio com medidas de (80x6) mm foram projetadas de acordo com a ABNT NBR IEC 61.439-6

Na Tabela 8 podemos observar as devidas elevações de temperaturas e temperaturas finais para os ensaios realizados no barramento blindado de 1.000 A com suas barras internas somente com revestimento superficial contra corrosão galvânica e oxidação, conforme Figura 2. Resultando assim numa temperatura final máxima em torno de 86 °C num dos pontos da extensão dos corpos de prova, bem como uma temperatura ambiente de 26 °C.

Finalmente, após aplicação de pintura com solução de grafeno na superfície das barras condutoras, bem como no Monobloco de junção dos elementos retos, foram realizados novamente os ensaios de elevação de temperatura de acordo com ABNT NBR IEC 61.439-6.

Considerando os resultados do ensaio de temperatura, podemos possível realizar projeção de aumento de 5 a 10% da corrente efetiva a ser percorrida nos condutores de alumínio. Desta forma, poderíamos percorrer até 1100 amperes.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Analisar a melhoria dos fatores elétricos como resistência/impedância e principalmente reatância indutiva. Consequentemente poderá resultar na melhoria das perdas elétricas, atendendo ainda melhor a questão da popularmente conhecida como queda de tensão exigida como fator limitante pelas concessionárias de energia.

Finalmente, em detrimento as propriedades do grafeno, serão realizados trabalhos futuros para entender a melhoria na capacidade de suportar níveis de curto-circuito, reforço mecânico no atracamento das pinças de acoplamento dos cofres de derivação.

## REFERÊNCIAS

ALUMINUM ASSOCIATION. **Databook**. [S.l.: s.n.], 2000.

ALVES, V. A. **Desenvolvimento de nanoesponja na base de grafeno para absorção de metais tóxicos em rejeitos de mineração**. 2021. 72 p. Trabalho de Graduação (Engenharia de Energia) – Faculdade UnB Gama, Brasília, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 61.439-1**: Conjunto de manobra e comando de baixa tensão – Parte 1: Regras gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 61.439-6**: Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 6: Sistemas de linhas elétricas pré-fabricadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BALACHANDRAN, U. *et al.* **Nanocarbon-infused metals**: a new class of covetic materials for energy applications. Materials Science and Technology Technical Meeting, Salt Lake City, UT, 2016.

BATISTA, C. Grafeno. 2020. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/grafeno/> Acesso em: 23 set. 2022.

BRASIL ESCOLA UOL. 2021. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/>. Acesso em: 3 dez. 2021.

CUNHA, L. Barramentos blindados. **Rev. O Setor Elétrico**, n. 41, p. 1-7, 2009.

DOWDEN, J. (ed). **The theory of laser materials processing: heat and mass transfer in modern technology**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.

FALCAO, E. H. L.; WUDL, F. Carbon allotropes: beyond graphite and diamond. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 82, n. 6, p. 524–531, 2007.

GALTEC. 2008. Disponível em: [http://www.galtec.srv.br/a\\_empresa.asp](http://www.galtec.srv.br/a_empresa.asp). Acesso em: 30 out. 2022.

GEIM, A. Graphene: status and prospects. **Science Magazine**, v. 324, p. 1530-1534, 2009.

ION, J. C. **Laser processing of engineering materials**: principles, procedure and industrial application. Butterworth-Heinemann, 2005.

KIM, H.; ABDALA, A. A.; MACOZKO, C. W. Graphene/polymer nanocomposites. **Macromolecules**, v. 43, n. 52, p. 5-25, 2010.

KUILLA, T. *et al.*, Recent advances in graphene-based Polymer composites. **Progress in Polymer Science**, v. 35, p. 1350-1375, 2010.

LIU, J. *et al.* Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites: powder synthesis and prepared composite characteristics. **Mater. Des.**, 94, 87–94, 2006.

LLEWELLYN, R. A.; TIPLER, P. A. **Física moderna**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. v. 3.

MAGNAN, M. D. C.; FERREIRA, C. A. M. **Pintura na proteção anticorrosiva**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Construção Naval). Centro Universitário Estadual da Zona Oeste. Rio de Janeiro, 2011

PASTRANA-MARTÍNEZ, L. *et al.* Nanotubos e grafeno: os primos mais jovens na família do carbono! **Química**, v. 128, p. 21–27, 2013.

PEI, S.; CHENG, H. M. *The reduction of graphene oxide*. **Revista Carbon**, v. 50, n. 12, p. 3210-3228, 2012.

PIERSON, H. O. **Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes**. Park Ridge, NJ: William Andrew, 1994.

POH, H. L. *et al.* Graphenes prepared by Staudenmaier, Hofmann and Hummers methods with consequent thermal exfoliation exhibit very different electrochemical properties. **Nanoscale**, n. 11, 2012.

REISS, T.; HJELT, K.; FERRARI, A. C. Graphene is on track to deliver on its promises **Nature Nanotechnology**. v. 14, n. 10, p. 904–910, 2019.

REN, W.; CHENG, H. *The global growth of graphene*. **Nature nanotechnology**, v. 9, p. 726-730, 2013

ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. **Materials Science and Engineering**, v. 37, p. 129–281, 2002.

SALEHI, D.; Brandt, M. *Melt pool temperature control using LabVIEW in Nd: YAG laser blown powder cladding process*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 29, n. 3/4, p. 273-278, 2006.

SANTOS, J. N. dos. **Condutores e cabos de energia**. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2005. Disponível em: <https://portalidea.com.br/cursos/2cc7650c634f81af9f8432dc921e3791.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2022.

VIANA, F. B. **Estudo de problemas de corrosão em cabos de aço zincado**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2015.

WANG, Feiran *et al.* Inter-flake quantum transport of electrons and holes in inkjet-printed graphene devices. **Advanced Functional Materials**, v. 31, n. 5, p. 2007478, 2021. Disponível em: <https://nottingham-repository.worktribe.com/output/4964621/inter-flake-quantum-transport-of-electrons-and-holes-in-inkjet-printed-graphene-devices>. Acesso em: 25 set. 2022.

ZARBIN, Aldo JG; OLIVEIRA, Marcela M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis? **Química Nova**, v. 36, p. 1533-1539, 2013.

ZIMMERMANN, B. L. S. **Características e vantagens da aplicação do barramento blindado em comparação ao sistema de cabeamentos**. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.