



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Bárbara Galvão Miranda

**Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Revestimentos
Quasicristalinos AlCuFeB e AlCuCo para Aplicação como Absorvedores Solares em
Colheita de Energia**

João Pessoa/PB

2024

Bárbara Galvão Miranda

**Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Revestimentos
Quasicristalinos AlCuFeB e AlCuCo para Aplicação como Absorvedores Solares em
Colheita de Energia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - Campus I, como parte dos requisitos para obtenção grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Alessandro Silva Guedes de Lima

João Pessoa/PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M672e Miranda, Bárbara Galvão.

Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Revestimentos Quasicristalinos AlCuFeB e AlCuCo para Aplicação como Absorvedores Solares em Colheita de Energia / Bárbara Galvão Miranda. - João Pessoa, 2024.
60 f. : il.

Orientação: Bruno Lima.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Quasicristais. 2. Ligas a base de AlCuFe. 3. Colheita de Energia. I. Lima, Bruno. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

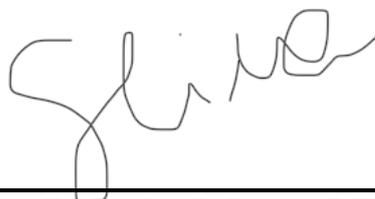
BÁRBARA GALVÃO MIRANDA

**Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas de Revestimentos
Quasicristalinos AlCuFeB e AlCuCo para Aplicação como Absorvedores Solares em
Colheita de Energia**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresento à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica, sob avaliação da banca examinadora a seguir:

Prof^o. Dr. Bruno Alessandro Silva Guedes de Lima – Orientador – DEM/CT/UFPB

Prof^o. Dr. Francisco Riccelly Pereira Feitosa – MEC/CT/UFPB



Prof^a. Dra. Danielle Guedes de Lima – DENM/CT/UFPB

**João Pessoa (PB)
FEVEREIRO/2024**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Paula e Edson, à minha irmã, Yngrid, e à minha avó, Dionízia, que sempre fizeram o possível e impossível para que eu recebesse a melhor educação possível.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por me guiar e dar as graças necessárias para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Paula e Edson, por sempre acreditaram em mim e não medirem esforços para que eu alcance os meus sonhos. Vosso amor e dedicação me inspiram.

À minha irmã, Yngrid, por todo amor, apoio e “puxões de orelha” que sempre me direcionam a alçar novos e maiores voos.

À minha avó, Dionízia *in memoriam*, que sempre estimulou em mim o amor às artes e à criatividade. Sem essas, que silenciam o mundo à minha volta, certamente não haveria aqui chegado.

Aos meus amigos, familiares e namorado, que sempre foram porto seguro, fonte de conselhos e risadas ao longo dessa trajetória.

Ao professor e orientador, Bruno Alessandro, que pacientemente me acolheu e me apresentou o interessantíssimo mundo da pesquisa científica e da carreira acadêmica. Seus valiosos ensinamentos e conselhos são inestimáveis.

Ao professor Rodinei *in memoriam*, que não hesitava em compartilhar seu vasto e profundo conhecimento àqueles que lhe buscavam.

Aos técnicos e colegas do LSR, em especial a Chiquinho, Meyson, Ricardo, Breno e Isaac, por sempre cederem seu tempo para ajudar uma curiosa aluna de iniciação científica.

Ao Laboratório de Microengenharia do CEAR, por contribuir com o presente trabalho.

À Universidade Federal da Paraíba e ao CNPq, por serem o pivô do meu desenvolvimento acadêmico, e por fomentarem a educação superior e a pesquisa no nosso país.

RESUMO

Devido às notáveis propriedades mecânicas e superficiais inerentes aos quasicristais, incluindo alta dureza, coeficiente de atrito reduzido, baixa energia superficial e excelente resistência à oxidação e corrosão, bem como suas condutividades elétrica e térmica relativamente limitadas, a pesquisa sobre esses materiais tem ganhado crescente atenção. Uma aplicação já consolidada para os quasicristais é o seu uso como revestimentos em superfícies destinadas à colheita de energia, devido a sua elevada capacidade de absorção de energia solar e baixa capacidade de emitir esta energia absorvida. Neste sentido, este trabalho teve como principal objetivo, investigar a microestrutura de superfícies revestidas com ligas complexas AlCuFeB e AlCuCo, visando à sua aplicação como absorvedores solares, e para explorar o impacto das microestruturas icosaédricas e decagonais nas propriedades mecânicas dos revestimentos e, para isto, uma série de análises foram conduzidas. Essas análises englobaram técnicas como a Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ensaio de Microdureza Vickers, avaliação da molhabilidade das superfícies e simulações térmicas. A partir desses estudos, foi constatado que os revestimentos quasicristalinos exibem propriedades atrativas para a sua aplicação como absorvedores solares. Notavelmente, os quasicristais apresentam uma maior capacidade de resistência térmica, destacando-se como material apto para desempenhar o papel de reservatório térmico em sistemas de coleta de energia térmica, quando comparados ao cobre puro. Além disso, quando unidos a geradores termoelétricos semicondutores, eles têm a capacidade de converter radiação solar em energia térmica e, subsequentemente, transformar essa energia térmica em eletricidade.

Palavras-chave: Quasicristais. Ligas a base de AlCuFe. Colheita de Energia.

ABSTRACT

Due to the remarkable inherent mechanical and surface properties of quasicrystals, including high hardness, reduced coefficient of friction, low surface energy, and excellent resistance to oxidation and corrosion, as well as their relatively limited electrical and thermal conductivities, research on these materials has been gaining increasing attention. In order to investigate the microstructure of surfaces coated with complex alloys AlCuFeB and AlCuCo, aiming at their application as solar absorbers, and to explore the impact of icosahedral and decagonal microstructures on the mechanical properties of the coatings, a series of analyses were conducted. These analyses encompassed techniques such as X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Vickers Microhardness testing, surface wettability evaluation, and thermal simulations. From these studies, it has been determined that quasicrystalline coatings exhibit attractive properties for their application as solar absorbers. Remarkably, quasicrystals showcase an enhanced capacity for thermal resistance, rendering them suitable as thermal reservoirs in thermal energy collection systems when compared to pure copper. Additionally, when coupled with semiconductor thermoelectric generators, they possess the capability to convert solar radiation into thermal energy, and subsequently transform this thermal energy into electricity.

Keywords: Quasicrystals. AlCuFe-based alloys. Energy harvesting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura interna de um TEG	16
Figura 2 - Composto cerâmico dióxido de silício (SiO ₂).....	18
Figura 3 - Ladrilhos de formato triangular	19
Figura 4 - Ladrilhos de formato quadrado	19
Figura 5 - Ladrilhos de formato hexagonal	20
Figura 6 - Ladrilhos de formato pentagonal	20
Figura 7 - MEV da Liga Al ₆₅ Cu ₁₅ Co ₂₀ de solidificação convencional.....	21
Figura 8 - Poliedro Icosaedral	21
Figura 9 - Fluxograma da metodologia	25
Figura 10 - Comparação entre bloco de Cobre a amostra revestida com liga quasicristalina pela técnica HVOF.	27
Figura 11 - Corte das amostras	27
Figura 12 - Prensa embutidora a quente para amostras metalográficas	29
Figura 13 - Amostra embutida com baquelite	29
Figura 14 - Equipamento utilizado para polimento	30
Figura 15 - Ensaio de molhabilidade	31
Figura 16 - Ensaio de temperatura.....	32
Figura 17 - Medição de temperatura com termovisor	32
Figura 18 - Configurações selecionadas para as emulações de padrões térmicos.....	34
Figura 19 - Plataforma de Emulação de Padrões Térmicos.....	35
Figura 20 - Plataforma de Emulação de Padrões Térmicos do Laboratório de Microengenharia	36
Figura 21 - Seção transversal da amostra revestida com a liga AlCuFeB.....	38
Figura 22 - Seção transversal da amostra revestida com a liga AlCuFeB.....	39
Figura 23 - Seção transversal da amostra revestida com a liga AlCuFeB.....	39
Figura 24 - DRX do pó de partida do revestimento quasicristalino AlCuFeB.....	40
Figura 25 - DRX do revestimento quasicristalino AlCuFeB após aspensão térmica	40
Figura 26 - DRX do revestimento quasicristalino AlCuCo.....	41
Figura 27 - Gota de água destilada em amostra da liga AlCuCo	43
Figura 28 - Gota de água salina em amostra da liga AlCuCo	43
Figura 29 - Pares de amostras com blocos de 32 e 35mm de espessura para análise comparativa	54

Figura 30 - Pares de amostras com blocos de 7mm de espessura para análise comparativa ...55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do forno de indução à vácuo para o tratamento térmico	28
Tabela 2 - Valores médios obtidos por Microdureza Vickers na amostra AlCuFeB	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Microdureza Vickers para AlCuFeB	42
Gráfico 2 - Análise de temperatura no decorrer do tempo da liga AlCuCo vs Cu puro.....	44
Gráfico 3 - Análise de temperatura no decorrer do tempo da liga AlCuFeB vs Cu puro.....	44
Gráfico 4 - Tensão Gerada Cu(1)-Cu(1).....	45
Gráfico 5 - Temperaturas Cu(1)-Cu(1).....	46
Gráfico 6 - Diferença de Temperatura Cu(1)-Cu(1).....	46
Gráfico 7 - Temperaturas Cu(2)-Cu(1).....	47
Gráfico 8 - Diferença de Temperatura Cu(2)-Cu(1).....	48
Gráfico 9 - Temperaturas Cu(3)-Cu(1).....	49
Gráfico 10 - Diferença de Temperatura Cu(3)-Cu(1).....	49
Gráfico 11 - Temperaturas QC(1)-Cu(1).....	50
Gráfico 12 - Diferença de Temperatura QC(1)-Cu(1).....	51
Gráfico 13 - Temperaturas QC(2)-Cu(1).....	52
Gráfico 14 - Diferença de Temperatura QC(2)-Cu(1).....	52
Gráfico 15 - Temperaturas QC(3)-Cu(1).....	53
Gráfico 16 - Diferença de Temperatura QC(3)-Cu(1).....	53
Gráfico 17 - Diferença de Temperatura dos pares de amostra com blocos de 32 e 35mm de espessura.....	55
Gráfico 18 - Diferença de Temperatura dos pares de amostra com blocos de 7mm de espessura.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QC – Quasicristal

SSA – *Selective Solar Absorber*

TEG – *Thermoelectric Generator*

TEC - *Thermoelectric Cooler*

IoT – *Internet of Things*

HVOF – *High-Velocity Oxygen Fuel*

LSR – Laboratório de Solidificação Rápida

CT – Centro de Tecnologia

NEPEM – Núcleo de Pesquisa de Materiais

CEAR – Centro de Energias Alternativas e Renováveis

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ – Delta

μ – Micrometro

θ – Teta

Å – Angström

% – Percentual

K – Kelvin

Pa – Pascal

° – Graus

°C – Grau Celsius

Hv – Dureza

N – Newton

at % – porcentagem atômica

ψ – Al₆Cu₂Fe - Icosaedral

β – Al₅(Cu,Fe), AlFe(Cu) - cúbica (tipo CsCl)

λ – Al₇Fe₂ - ortorrómbica

λ – Al₁₃Fe₄ – Monoclínica

D – decagonal

B₂ – Al(Co,Cu)

m – Al₁₃Co₄

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
3.1	Objetivos gerais	16
3.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Materiais quasicristalinos	18
2.2	Ligas a base de Al	21
2.3	Propriedades e aplicações dos quasicristais	22
2.4	Colheitas de energia	23
2.5	Colheita de energia baseada no uso de revestimentos quasicristalinos	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	Produção das ligas Quasicristalinas	26
3.2	Revestimento quasicristalinos	26
3.3	Corte da amostra	27
3.4	Tratamento térmico	27
3.5	Embutimento	28
3.6	Lixa e polimento	29
3.7	Difração de Raios-X (DRX)	30
3.8	Microdureza Vickers	30
3.9	Molhabilidade	30
3.10	Ensaio de Temperatura	31
3.11	Desenvolvimento de Coletor de Energia e Emulação de Padrões Térmicos	33
3.11.1	Plataforma de Emulação de Padrões Térmicos	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Microscopia ótica	38
4.2	Difração de Raios-X (DRX)	40
4.3	Microdureza Vickers	42
4.4	Molhabilidade	43
4.5	Ensaio de Temperatura	44
4.6	Emulação de Padrões Térmicos	45
4.6.1	Cu(1)-Cu(1)	45
4.6.2	Cu(2)-Cu(1)	47

4.6.3	Cu(3)-Cu(1)	49
4.6.4	QC(1)-Cu(1)	50
4.6.5	QC(2)-Cu(1)	52
4.6.6	QC(3)-Cu(1)	53
4.7	Diferença de Temperatura (ΔT)	54
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Um campo de estudo que vem ganhando destaque é o da colheita de energia, que busca aproveitar recursos naturais, como a radiação solar, para a geração de energia, que traz uma solução à dependência de fontes tradicionais e não renováveis através de fontes limpas e sustentáveis.

A colheita de energia é definida como a captação de energia desperdiçada de fontes ambientais (HARB, 2011), como a luz solar, calor, ondas eletromagnéticas, ondas mecânicas, movimento mecânico, entre outras. Essa captação de energia é realizada por um dispositivo transdutor que também converte essa energia em eletricidade (RAMADASS; CHANDRAKASAN, 2011).

Dispositivos de colheita de energia têm potencial para serem alternativas às baterias em dispositivos de baixo consumo de energia, ou para prolongar a vida útil das baterias, carregando baterias recarregáveis. Além disso, dispositivos ligados à Internet das Coisas (IoT), principalmente, podem se beneficiar de melhorias na colheita de energia a fim de evitar o uso e descarte de baterias no meio ambiente (OLIVEIRA et al., 2021).

Neste contexto, os materiais quasicristalinos despontam como protagonistas promissores (OLIVEIRA et al., 2021). Estes materiais exibem propriedades únicas que os diferenciam dos materiais cristalinos convencionais, apresentando estruturas quase-periódicas no arranjo dos seus átomos (DE LIMA, 2011). Suas características peculiares conferem-lhes propriedades mecânicas notáveis, tornando-os candidatos ideais para diversas aplicações tecnológicas.

Mesmo sendo formados por combinações de metais puros, os quasicristais apresentam propriedades que os assemelham mais aos materiais cerâmicos do que aos metálicos, como elevada dureza, baixa condutividade elétrica e térmica, além de boa absorção de luz infravermelha (DE LIMA, 2015).

Devido a elevada dureza dos materiais quasicristalinos, a alta fragilidade limita a sua aplicação. Dessa forma, seu uso dá-se, frequentemente, em forma de pó, tornando-o um excelente material para ser aspergido termicamente na superfície de um substrato (DE LIMA, 2015).

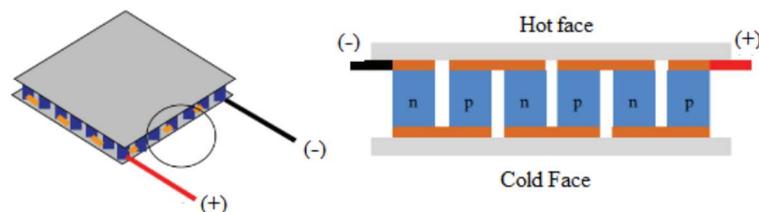
Uma área de pesquisa em ascensão é a investigação e aprimoramento de absorvedores solares seletivos (SSA - Selective Solar Absorber). Esses dispositivos possuem a capacidade de

absorver seletivamente radiações eletromagnéticas, convertendo-as em calor utilizável para a geração de energia (OLIVEIRA et al., 2021). A aplicação dos absorvedores solares seletivos pode ser incorporada em sistemas de colheita de energia. Com geradores termoelétricos semicondutores, ou TEGs (Thermoelectric Generators), chega-se à conversão de energia térmica em energia elétrica.

O funcionamento dos TEGs repousa sobre o efeito Seebeck, um fenômeno termoelétrico que traduz diferenças de temperatura em energia elétrica. Esses geradores consistem em substratos cerâmicos dispostos em paralelo, constituindo bons condutores de calor e oferecendo resistência elétrica. Entre os substratos, termopares semicondutores do tipo n e p são conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, possibilitando a geração de energia elétrica a partir da energia térmica (CAMBOIN et al., 2019).

A tensão elétrica gerada por um TEG é proporcional ao gradiente de temperatura nas placas cerâmicas. Isto é, $\Delta T = (\text{temperatura da face quente}) - (\text{temperatura da face fria})$. (RAMADASS; CHANDRAKASAN, 2011).

Figura 1 - Estrutura interna de um TEG



Fonte: OLIVEIRA (2020)

Além dos aspectos energéticos, a análise das propriedades mecânicas das superfícies revestidas assume um papel de destaque. Dada a exposição dessas superfícies a intempéries e condições adversas na aplicação prática, a avaliação do comportamento mecânico torna-se fundamental. No contexto metalúrgico, entender como esses revestimentos se comportam sob diferentes circunstâncias é crucial para garantir a durabilidade e a eficácia desses dispositivos inovadores.

3.1 Objetivos gerais

Ao compreender as possibilidades oferecidas por essas tecnologias, o objetivo principal deste trabalho é o estudo das propriedades mecânicas e térmicas de revestimentos de ligas

Quasicristalinas a base de alumínio com estruturas Icosaedral e Decagonal aspergidos em substratos cobre através da técnica de aspersão térmica HVOF para compreender a aplicabilidade desses materiais como revestimentos em superfícies de absorvedores solar seletivos, visando a construção de um transdutor de energia térmica em elétrica baseado em geradores termoelétricos à semicondutor (TEGs) para colheita de energia.

3.2 Objetivos específicos

- 1 Estudo das propriedades mecânicas através do teste de microdureza Vickers;
- 2 Estudo de superfície através do ensaio de molhabilidade;
- 3 Estudo das propriedades térmicas dos revestimentos quasicristalinos AlCuFeB e AlCuCo;
- 4 Comparar desempenho de absorvedores solares com base em ligas quasicristalinas e com base em cobre.

2 REVISÃO DA LITERATURA

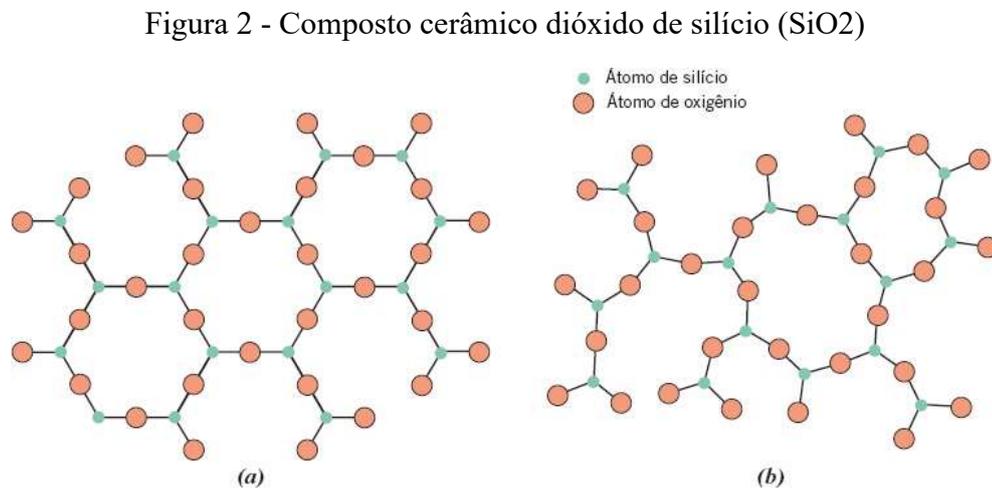
2.1 Materiais quasicristalinos

Os quasicristais recebem esse nome por suas estruturas atômicas encontrarem-se entre o cristal e o amorfo, isto é, não se caracterizam como nem esse, nem aquele, tornando-se uma estrutura intermediária (SHAÏTURA; ENALEEVA, 2007).

Os materiais cristalinos são caracterizados pelo arranjo dos seus átomos ou íons no espaço tridimensional. Este arranjo é dado de forma ordenada em um padrão que se repete ao longo de grandes distâncias atômicas (CALLISTER, 2015).

Aqueles sólidos que não apresentam um arranjo atômico regular e sistemático ao longo de distâncias atômicas relativamente grandes são chamados amorfos, i.e., “sem forma” (CALLISTER, 2015).

Como exemplo, podemos observar o composto cerâmico dióxido de silício (SiO_2) nos seus dois estados: cristalino (Figura 2a) e amorfo (Figura 2b). Comparando-os, nota-se que na estrutura amorfa o arranjo dos átomos dá-se de uma maneira desordenada e irregular.



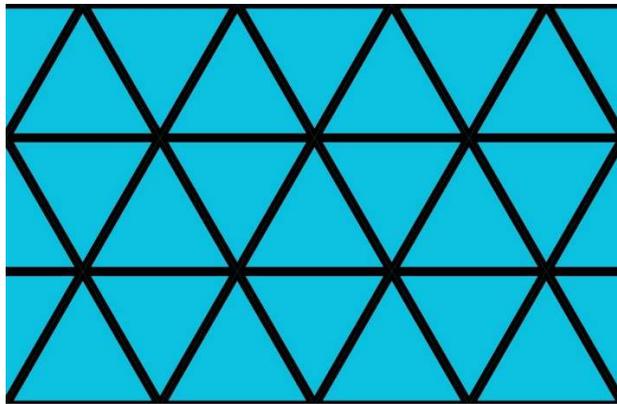
Fonte: CALLISTER (2015)

Enquanto os materiais amorfos não possuem periodicidade alguma, os cristalinos respeitam algumas regras, dentre elas as simetrias rotacionais, podendo ser da ordem de dois, três, quatro ou seis (HUTTUNEN-SAARIVIRTA, 2004). Já a estrutura dos QCs é considerada quase-periódica, e essa característica dá-se pela capacidade de apresentarem uma simetria rotacional, que até a sua descoberta em 1982 por Shechtman, não era permitida pela

cristalografia clássica: eixos de rotações de ordem cinco, oito, dez e até doze (HUTTUNEN-SAARIVIRTA, 2004).

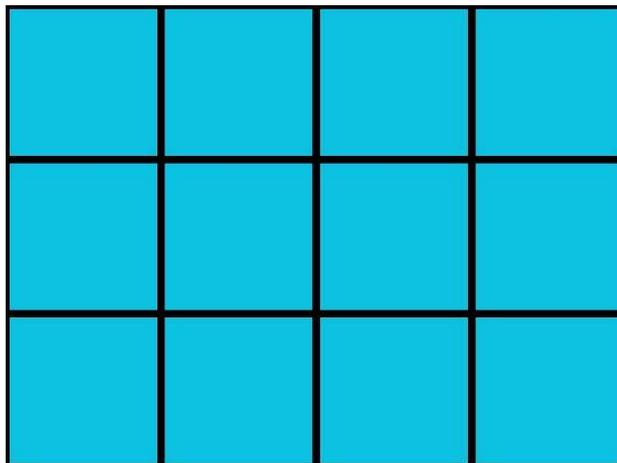
Para melhor entendimento desse conceito, é válido imaginar um chão que necessita ser coberto por ladrilhos. Seria possível cobri-lo inteiramente com ladrilhos de formato triangular (Figura 3), quadrado (Figura 4), retangular ou hexagonal (Figura 5). Mas, ao tentar utilizar ladrilhos de formato pentagonal (Figura 6), por exemplo, encontraríamos um problema: sobriam espaços vazios. Assim, temos uma simetria rotacional não permitida. O mesmo acontece com os demais: sobram espaços vazios (Dubois, 2005).

Figura 3 - Ladrilhos de formato triangular



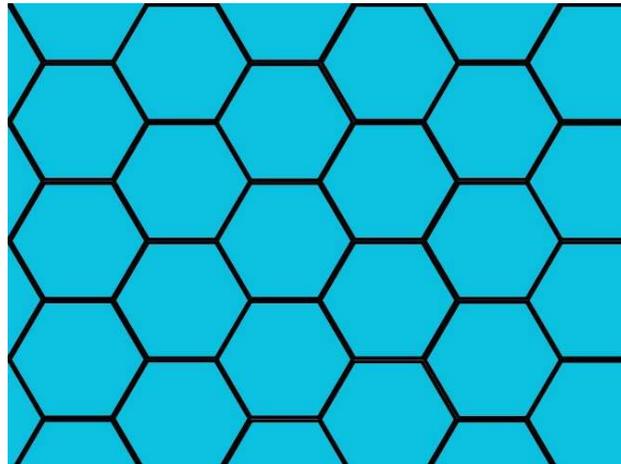
Fonte: autoria própria.

Figura 4 - Ladrilhos de formato quadrado



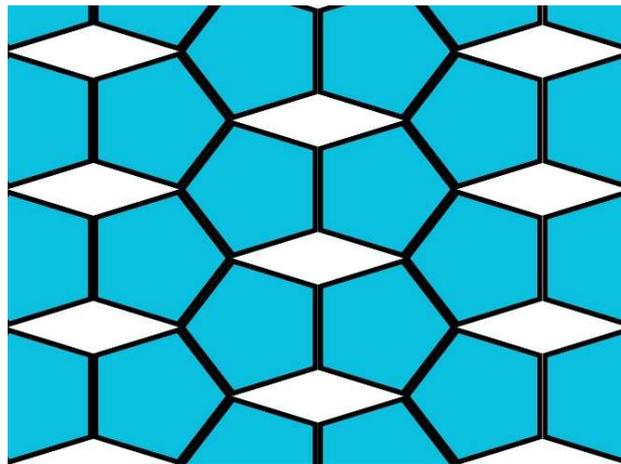
Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Ladrilhos de formato hexagonal



Fonte: autoria própria.

Figura 6 - Ladrilhos de formato pentagonal



Fonte: autoria própria.

Os quasicristais fazem parte do grupo de Ligas Metálicas Complexas, que são caracterizadas por (i) sua fórmula química, (ii) o tamanho de sua célula unitária e (iii) a variedade de conjuntos atômicos que essa célula unitária contém. Para QCs, o limite superior do tamanho da célula unitária é infinito, sendo mais difícil avaliar o limite inferior (DUBOIS; BELLIN-FERRÉ; FEUERBACHER, 1988).

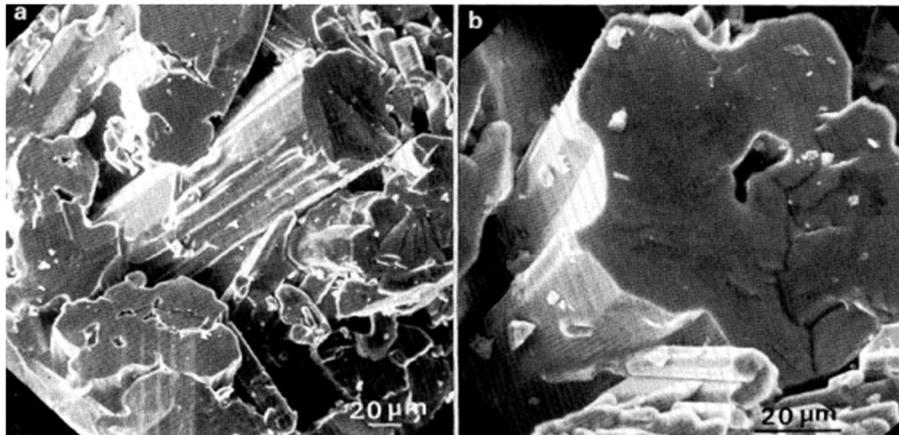
2.2 Ligas a base de Al

As primeiras ligas quasicristalinas conhecidas eram metaestáveis. Apenas ao final da década de 1980, foram descobertos quasicristais estáveis em ligas ternárias, tais quais Al-Cu-Fe, Al-Cu-Co, dentre outras (FEITOSA, 2018).

Deu-se início, a partir deste momento, ao estudo dessas ligas. Com isso, foi observado que o efeito da substituição do ferro por cobalto na composição $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15-x}Co_x$ ($x = 0, 5, 10, 15$ e 20% at), resultava na fase icosaedral e decagonal coexistindo. E, com o aumento do teor de cobalto na liga, a fase decagonal aparecia com maior evidência (FEITOSA, 2018).

Na estrutura decagonal estável a morfologia observada é colunar (Figura 7); diferentemente da morfologia icosaedral (Figura 8), que apresenta uma simetria pentagonal (FEITOSA, 2018).

Figura 7 - MEV da Liga Al65Cu15Co20 de solidificação convencional



Fonte: FEITOSA, 2018.

Figura 8 - Poliedro Icosaedral



Fonte: PASSOS, 2006.

Há diversas ligas com simetria decagonal estável conhecidas hoje, sendo as mais importantes e mais estudadas as encontradas nos sistemas Al-Ni-Co e Al-Cu-Co (FEITOSA, 2018).

Como discutido anteriormente, devido a sua elevada dureza, a maioria dos QCs são bastante frágeis em temperatura ambiente. Assim, mesmo quando submetidos à pequenas deformações, tornam-se passíveis de fraturas. A fim de contornar essa característica em ligas de Al-Cu-Fe, é possível adicionar uma pequena quantidade de boro para modificar a sua estrutura e aumentar significativamente a resistência à fratura da liga (DE LIMA, 2015).

2.3 Propriedades e aplicações dos quasicristais

Os quasicristais, que são compostos por elementos de natureza metálica, apresentam propriedades surpreendentes, visto que não se comportam como compostos intermetálicos convencionais (DUBOIS, 2001).

As propriedades físicas, térmicas e mecânicas deste material tornam-no notável e oferece aplicações interessantes que vêm sendo estudadas ao longo dos anos. Elevada dureza, baixa condutividade térmica, baixa densidade, boa oxidação e resistência à corrosão e baixo coeficiente de atrito são algumas das propriedades exibidas pelos QCs (CHATTOPADHYAY et al., 2000).

A resistividade elétrica nos QCs aumenta progressivamente quando a temperatura diminui. Em baixas temperaturas (4 K), chega a apresentar valores cerca de 3 (três) vezes maiores que seus constituintes metálicos, quando analisados individualmente. Já a condutividade elétrica aumenta com a temperatura. Essas tendências são opostas ao comportamento de metais como o alumínio, assemelhando-os mais a semicondutores (DUBOIS, 2001).

Por outro lado, a condutividade térmica é extremamente baixa. Quando sua temperatura ultrapassa cerca de 600 °C, torna-se maleável, possibilitando o uso de quasicristais como revestimento de barreira térmica em motores de automóveis, turbinas a vapor, algumas peças de compressores de aeronaves ou dispositivos criogênicos (DUBOIS, 2001). Inclusive, o revestimento já foi testado como revestimento de barreira térmica em motores de aeronaves (CHATTOPADHYAY et al., 2000).

Quanto às propriedades mecânicas dos quasicristais, estes são materiais essencialmente duros. Apresentam uma dureza da ordem de 0,8 a 1,1 GPa, tornando-os frágeis em temperaturas abaixo de cerca de 500 °C (DUBOIS, 2001). Ademais, apresentam valores baixos de tenacidade

à fratura (FEITOSA, 2018). Dessa forma, suas propriedades convergem para mostrar que dificilmente se comportam como metais sob tensão (DUBOIS, 2005).

O coeficiente médio de atrito para quasicristais em massa é de 0,15, um valor que é 2 (duas) a 3 (três) vezes menor que o coeficiente de atrito da liga de alumínio AU4G (SHAÏTURA; ENALEEVA, 2007). Em quasicristais icosaedrais AlCuFe e suas fases aproximantes, é cerca de 1/3 do coeficiente de atrito de um aço comercial de baixo carbono (FEITOSA, 2018).

Quando expostos ao ar, os quasicristais oxidam, tal qual a maioria dos metais ou compostos intermetálicos. Entretanto, a camada de óxido que se forma é fina (cerca de 5 nm) e passivadora até algumas centenas de graus celsius (FEITOSA, 2018).

A molhabilidade com líquidos polares como água na superfície dos quasicristais também é reduzida em comparação com superfícies metálicas ou de óxido (DUBOIS, 2001). Como são compostos essencialmente de água, é plausível o uso dos quasicristais em revestimentos no uso de utensílios de cozinha. Apesar de não possuir uma energia superficial tão baixa quanto a do Teflon, pode se apresentar como uma solução intermediária entre este, que é mecanicamente macio, e outros materiais usados em utensílios de cozinha como aço inoxidável, vidro, esmaltes, etc (DUBOIS, 2005). Com isso, uma das primeiras aplicações dos quasicristais foi no revestimento da frigideira Cybernox, produzidos por aspensão térmica (FEITOSA, 2018).

2.4 Colheitas de energia

A colheita de energia é a conversão da energia presente no meio ambiente em energia elétrica (MATIKO et al., 2014).

Tipicamente, a colheita de energia está relacionada à conversão de pequenas quantidades de energia provindas do ambiente, e que na maioria dos casos são desperdiçadas sem uso específico, como, por exemplo: da luz, do calor, da vibração, do fluxo de ar e etc, para uso no fornecimento de energia para dispositivos eletrônicos pequenos e de baixa potência (MATIKO et al., 2014).

Assim, tem atraído o interesse de diversos pesquisadores devido seu potencial uso como fonte de energia em aplicações como redes de sensores sem fio de baixa potência e sistemas eletrônicos (MATIKO et al., 2014).

2.5 Colheita de energia baseada no uso de revestimentos quasicristalinos

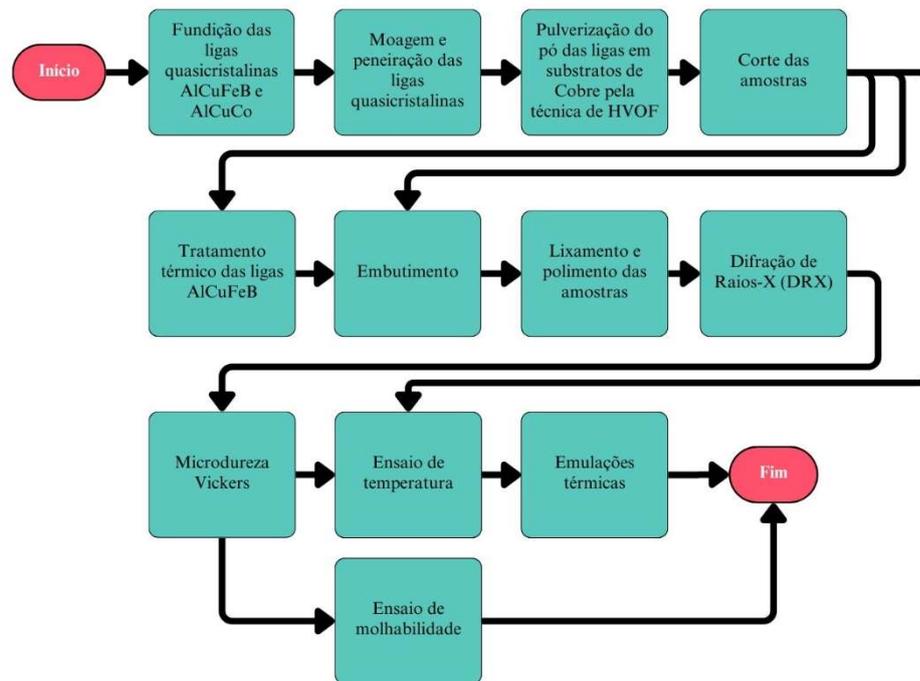
Dado que os QCs são maus condutores térmicos, é plausível a sua utilização para captação de energia solar em uma colheita de energia.

Foi proposto por OLIVEIRA et al. (2020), um coletor de energia termoelétrica alimentado por radiação solar, no qual um absorvedor solar seletivo (SSA) baseado em uma liga quasicristalina foi utilizado para absorver energia solar e, utilizando um gerador termoelétrico (TEG), gerar energia elétrica.

Foram propostos dois arranjos do coletor de energia de acordo com sua posição em relação à radiação solar: (i) coletor de energia posicionado horizontalmente e (ii) coletor de energia posicionado verticalmente. Em seus resultados experimentais, a configuração vertical alcançou um gradiente de temperatura $\Delta T = 27,33 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a horizontal alcançou $\Delta T = 3,64 \text{ }^\circ\text{C}$. Como consequência, esse alcançou V acima de 75 mV, enquanto aquele alcançou V acima de 220 mV. Dessa forma, o coletor de energia posicionado verticalmente foi mais eficaz ao colher energia de radiação solar (OLIVEIRA et al., 2020).

3 METODOLOGIA

Figura 9 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria.

Do preparo das amostras aos ensaios, diversos laboratórios colaboraram com esta pesquisa. Da fundição das ligas quasicristalinas à moagem e peneiração, foram realizados no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR), localizado no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba; A pulverização do pó das ligas em substratos de Cobre pela técnica de HVOF deram-se nas instalações da empresa OGRAMAC METALIZAÇÃO, situada em Santo Antônio de Posse – SP; Também no LSR forma realizados os tratamentos térmicos, preparo das amostras, ensaio de microdureza Vickers e ensaio de molhabilidade; Os demais, Difração de Raios-X e Emulações de Padrões Térmicos, foram realizados no Núcleo de Pesquisa de Materiais (NEPEM) do CT, e no Laboratório de Microengenharia do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), respectivamente. Vale salientar que os pós das ligas foram produzidos e aspergidos termicamente previamente a este trabalho por outrem, mas segue abaixo o método utilizado nessas etapas.

3.1 Produção das ligas Quasicristalinas

O trabalho iniciou-se a partir da produção das ligas Quasicristalinas $Al_{59}Cu_{25,5}Fe_{12,5}B_3$ e $Al_{65}Cu_{17}Co_{18}$ de estruturas Icosaedral e Decagonal, respectivamente.

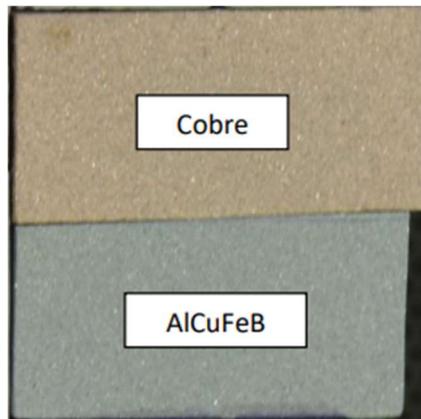
O processo de produção da liga AlCuFeB iniciou-se a partir da elaboração das ligas “mães” Fe-B e Al-Fe, e posteriormente foi realizada a fundição da liga quasicristalina como um todo. Na primeira, Fe-B, obtida por fusão, utilizou-se um forno de indução equipado com um cadinho de Cobre de soleira fria e uma atmosfera de argônio, gás inerte. O equipamento foi usado objetivando a obtenção da liga o mais próximo possível da composição nominal, bem como um alto grau de pureza, visto que este forno trabalha sob uma atmosfera praticamente isenta de elementos contaminantes do metal líquido, como Oxigênio e o Nitrogênio, que geram oxidação. Para a fabricação da liga “mãe” Al-Fe foi utilizado um forno de indução, o qual realiza fusões empregando o mesmo princípio do indutor com espiras em atmosfera ambiente. Posteriormente, nesse mesmo forno, foi realizada a fundição da liga quasicristalina.

A produção da liga AlCuCo, similarmente à anterior, também se utilizou do forno de indução com um cadinho de soleira fria, submetida à fusão em atmosfera de argônio. Cada unidade da liga passou por duas fusões para assegurar uma homogeneização mais eficaz.

3.2 Revestimento quasicristalinos

Após a confecção das “ligas brutas de fusão”, procedeu-se a moagem e a posterior peneiração dos materiais, resultando em grãos com dimensões variando entre $+25\mu\text{m}$ e $-45\mu\text{m}$. Subsequentemente, os pós quasicristalinos foram depositados nas superfícies de um substrato de Cobre utilizando a técnica de aspensão térmica High Velocity Oxy Fuel (HVOF). Essa fase foi realizada na empresa OGRAMAC METALIZAÇÃO, situada em Santo Antônio de Posse - SP. O equipamento utilizado para a aspensão foi o HP - HVOF - Praxair JP-5000, operando a uma velocidade equivalente à Mach 3, com uma taxa de alimentação de 34 g / min.

Figura 10 - Comparação entre bloco de Cobre a amostra revestida com liga quasicristalina pela técnica HVOF.



Fonte: autoria própria.

3.3 Corte da amostra

A amostra bruta foi adquirida em formato circular e necessitou passar pelo processo de corte para ser utilizada nas etapas posteriores. Para esta etapa foi utilizada uma máquina de corte de alta precisão (Figura 11), à uma velocidade de corte entre 300-350 rpm (rotações por minuto),

Figura 11 - Corte das amostras



Fonte: autoria própria.

3.4 Tratamento térmico

Como resultado do processo de solidificação no forno de soleira fria, tem-se uma liga heterogênea contendo fases cristalinas e quasicristalinas. Dessa forma, foram feitos tratamentos

térmicos na liga de AlCuFeB a fim de fornecer energia para a transformação peritética das fases, aumentando a quantidade da fase quasicristalina na liga. Apenas as ligas de AlCuFeB foram submetidas à um tratamento térmico para comparação dos resultados nos ensaios posteriores.

O tratamento térmico deu-se em um forno de indução à vácuo, sob os parâmetros apresentados na Tabela 1. Para diminuir a oxidação da liga, foram feitas lavagens do forno, isto é, introduz-se gás inerte (nesse caso, hélio) até uma pressão de $-0,08\text{MPa}$, em seguida é feito um bombeamento até a pressão de, aproximadamente, $1,33 \times 10^{-7}\text{MPa}$. Repetem-se esses passos por três vezes, tendo por objetivo minimizar oxigênio residual no forno. Adicionalmente, junto à amostra, utilizou-se pedaços de titânio como “amostra de sacrifício”, afim de, também, reduzir a possibilidade de oxidação do material quasicristalino. Por fim, as fusões foram realizadas mantendo-se a pressão de $-0,08\text{MPa}$ de hélio.

Tabela 1 - Parâmetros do forno de indução à vácuo para o tratamento térmico

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)
60	30 – 600
30	600 – 750
5	750
60	750 – 30

Fonte: autoria própria.

3.5 Embutimento

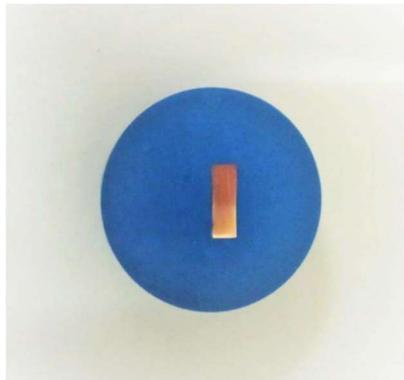
Para melhor manusear as pequenas amostras, fez-se necessário fazer um embutimento convencional, utilizando uma prensa embutidora a quente para amostras metalográficas (Fig. 12). Foi utilizado baquelite (Figura 13), e os parâmetros adotados na prensa foram 5 minutos à 190°C e 5,5 minutos de resfriamento.

Figura 12 - Prensa embutidora a quente para amostras metalográficas



Fonte: autoria própria.

Figura 13 - Amostra embutida com baquelite



Fonte: autoria própria.

3.6 Lixa e polimento

As amostras embutidas passaram pelos processos de lixa e polimento. Durante o processo o processo de lixa, as amostras passaram por uma quantidade diversa de granulometrias: 220, 360, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 e 2000. Após o processo de lixa, deu-se início a etapa de polimento (Figura 14). Para este procedimento foi adotada uma velocidade de 350 rpm para a politriz, e pastas de diamantes com três granulometrias diferentes: 6 μ , 3 μ e 1 μ . No intervalo entre cada lixa e polimento, foram realizadas verificações de qualidade, com o auxílio do microscópio ótico. Por fim, foram limpas utilizando-se álcool isopropílico a 99,5% e o ultrassom Spencer do Laboratório de Solidificação Rápida.

Figura 14 - Equipamento utilizado para polimento



Fonte: autoria própria.

3.7 Difração de Raios-X (DRX)

As amostras foram analisadas em um equipamento de difração de raios-x do modelo SIEMENS. Nesse ensaio utilizou-se um tubo de Cobre com comprimento de onda de $1,5406\text{\AA}$ com tensão de 40kV , corrente de 30mA , passo de $0,01^\circ$, tempo por passo de 3s e o ângulo 2θ (2 -theta) variando de 20 a 120 graus.

3.8 Microdureza Vickers

Os valores de dureza das superfícies foram obtidos através de testes de microdureza. Os ensaios foram realizados utilizando o método Vickers, empregando um diamante piramidal de base quadrada como penetrador. Foram utilizadas cargas de 100 mN , 300 mN e 500 mN para os testes. O equipamento utilizado foi o microdurômetro Vickers SHIMADZU HMV-2T.

3.9 Molhabilidade

O ensaio de molhabilidade foi realizado no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR/UFPB), com equipamento composto por: (i) fonte luminosa, (ii) micropipeta, (iii) suporte para as amostras, (iv) câmera de alta resolução modelo Phantom v711, da Vision Research e (v) computador, conforme ilustrado na figura 15. Os líquidos utilizados para esse fim foram água salina e água destilada.

A micropipeta depositou as gotas a uma distância de 3 mm da superfície revestida das amostras de AlCuFeB e AlCuCo. Após essa etapa, um período de 5 segundos foi dado para garantir a estabilização das gotas antes de capturar as imagens.

A avaliação das imagens foi realizada utilizando o software SurfTens, versão 4.5. Cada gota foi medida em relação ao ângulo de contato por um total de sete vezes.

Figura 15 - Ensaio de molhabilidade

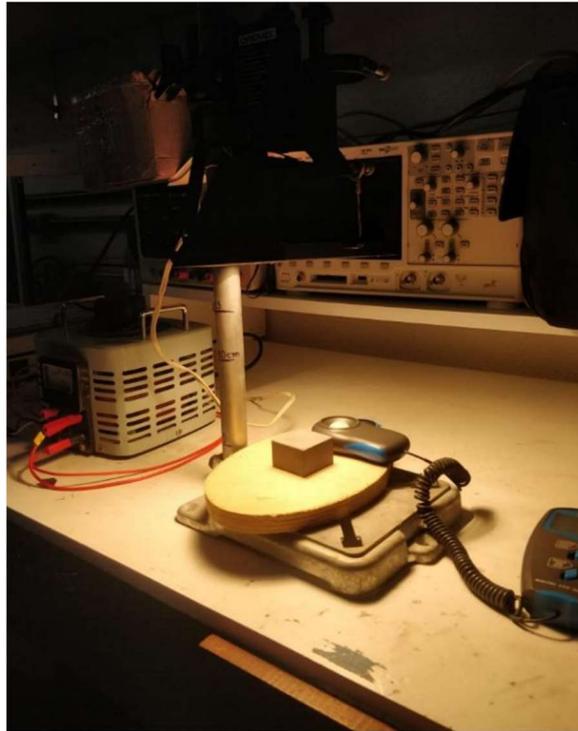


Fonte: autoria própria.

3.10 Ensaio de Temperatura

O ensaio de temperatura consiste em aquecer a amostra com uma fonte de luz externa e verificar sua temperatura ao longo do tempo. O ensaio foi feito com Cobre Revestido com AlCuFeB e AlCuCo, e Cobre puro. A emissão de luz foi de aproximadamente 372 lux, por um período de 10 minutos, sendo 5 de aquecimento e mais 5 de resfriamento. A temperatura foi medida com um termovisor, em intervalos de 30 segundos, tanto para o aquecimento, quanto para o resfriamento.

Figura 16 - Ensaio de temperatura



Fonte: autoria própria.

Figura 17 - Medição de temperatura com termovisor



Fonte: autoria própria.

3.11 Desenvolvimento de Coletor de Energia e Emulação de Padrões Térmicos

O coletor de energia em questão foi baseado no estudo proposto por OLIVEIRA et al. (2020), onde se utiliza um absorvedor solar seletivo (SSA) baseado em uma liga quasicristalina para captar energia solar e, como resultado, gerar energia elétrica por meio de um Gerador Termoelétrico (TEG), sendo este um dispositivo comercial modelo TEC1-12706.

A configuração utilizada para o presente trabalho foi vertical. O bloco superior do coletor feito de substrato de cobre totalmente ou parcialmente revestido pela liga quasicristalina de AlCuFeB ou de AlCuCo, atuando como um absorvedor de calor; Na parte inferior do coletor, um bloco de cobre de atuando como um dissipador de calor.

Para fins de comparação, foram testados além dos pares Quasicristal-Cobre, pares de Cobre-Cobre com blocos de dimensões semelhantes aos quasicristais (QC) para compararmos a variação de temperatura, dado que quanto maior for a variação de temperatura, maior a tensão gerada. Foram testadas seis diferentes configurações de pares, utilizando seis blocos diferentes.

Os blocos e as configurações testadas estão descritos abaixo:

Blocos

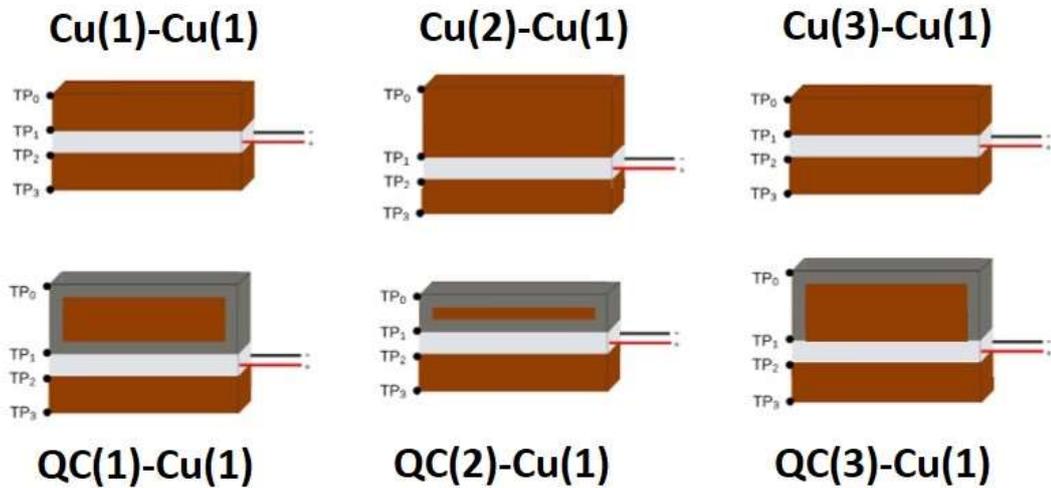
- Cu(1) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 10mm
- Cu(2) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 32mm
- Cu(3) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 7mm
- QC(1) - Bloco totalmente revestido (AlCuCo): 40mm x 40mm x 35mm
- QC(2) - Bloco totalmente revestido (AlCuFeB): 40mm x 40mm x 7mm
- QC(3) - Bloco com face não revestida (AlCuFeB): 40mm x 40mm x 32mm

Configurações

Para estas, o bloco superior está descrito primeiro, e o inferior em seguida. (Exemplo: QC(2)-Cu(1), o bloco superior é o QC(2) e o inferior, Cu(1)).

- Cu(1)-Cu(1)
- Cu(2)-Cu(1)
- Cu(3)-Cu(1)
- QC(1)-Cu(1)
- QC(2)-Cu(1)
- QC(3)-Cu(1)

Figura 18 - Configurações selecionadas para as emulações de padrões térmicos

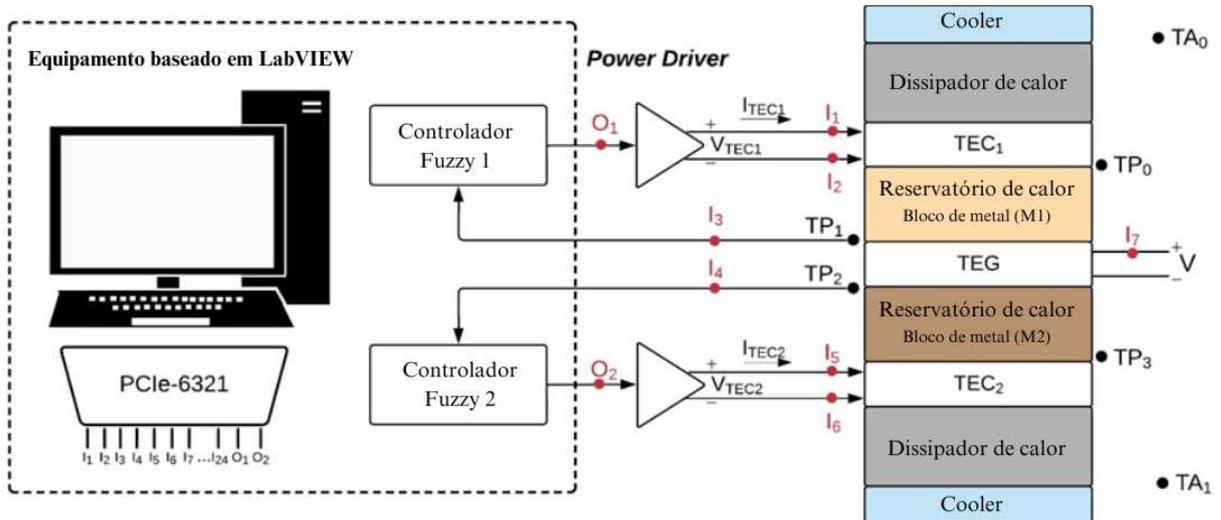


Fonte: autoria própria.

3.11.1 Plataforma de Emulação de Padrões Térmicos

Foi apresentada por VÉRAS et al. (2015) uma estrutura concebida para simular padrões térmicos, que consiste em uma plataforma simétrica. Essa plataforma é composta por duas unidades de resfriamento (coolers), dois dispositivos de dissipação de calor (dissipadores de calor), dois reservatórios de calor (M1 e M2) além de dois módulos termoeletrônicos à semicondutor (TEC1 e TEC2) funcionando como refrigeradores termoeletrônicos, e ainda um gerador termoeletrônico (TEG) posicionado entre os TECs. A Figura 19 ilustra o esquema da configuração da plataforma.

Figura 19 - Plataforma de Emulação de Padrões Térmicos

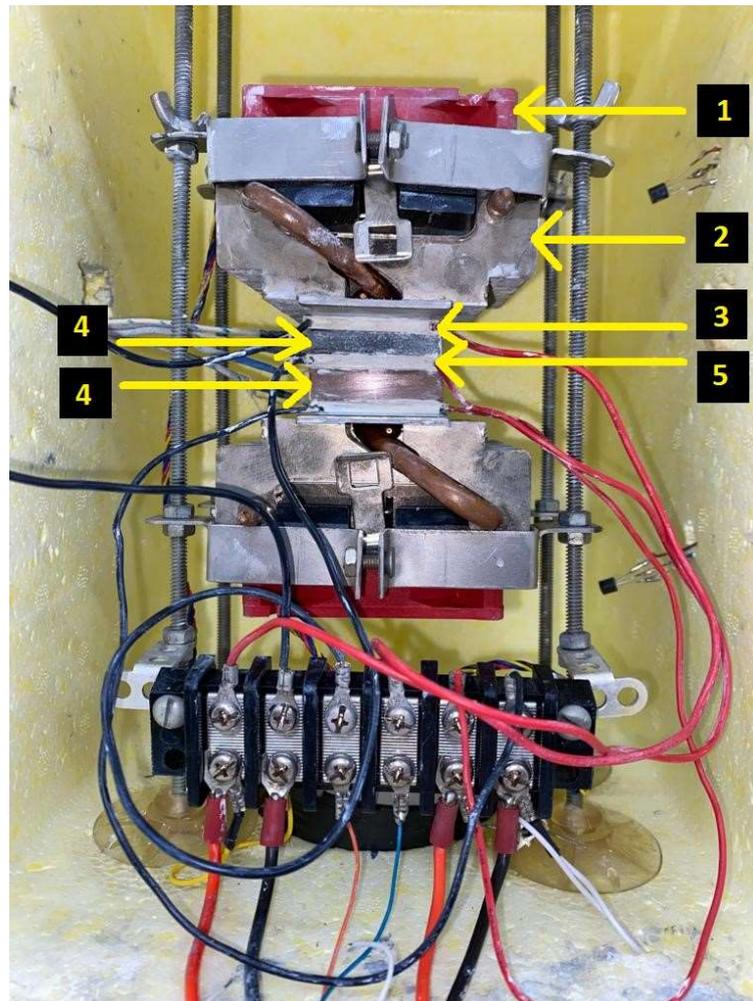


Fonte: Adaptado de VÉRAS et al. (2015)

As emulações térmicas foram feitas no Laboratório de Microengenharia do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), onde a plataforma (Figura 20), conta com um gerador termoelétrico (TEG) modelo TEC1-12706 (5) centralizado entre (1) um cooler, (2) um dissipador de calor (Alumínio), (3) um módulo termoelétrico (TEC), (4) um reservatório térmico (nesse caso, QC ou Cu), dispostos de maneira simétrica de cada lado do TEG.

Nessa plataforma, é possível determinar uma temperatura desejada na face superior do TEG (TP1), e uma temperatura desejada na face inferior (TP2), a partir do calor fornecido pelos TECs, que regulam a temperatura do TEG central através da condução de calor através dos reservatórios térmicos. As temperaturas nas faces dos TECs em contato com os reservatórios térmicos são chamadas de TP0 e TP3. Com base nessas condições, o TEG central é submetido a uma diferença de temperatura ΔT igual a $TP1 - TP2$.

Figura 20 - Plataforma de Emulação de Padrões Térmicos do Laboratório de Microengenharia



Fonte: autoria própria.

A operação da plataforma e a coleta de dados relacionados às variáveis térmicas e elétricas são conduzidas utilizando um sistema de controle que se baseia no software LabVIEW e na placa de aquisição PCIe-6321 da National Instruments. Através desse sistema é possível realizar ajustes nas temperaturas TP1 e TP2, além de definir a duração total da simulação (considerando o tempo transitório, o tempo durante o qual o controlador está ativo e o tempo em que o controlador está desativado). Assim, são obtidos os registros instantâneos da temperatura na parte superior do bloco (TP1), da temperatura na parte inferior do bloco (TP2) e da tensão gerada.

Para todos os ensaios, os tempos utilizados foram:

- Tempo do Transitório: 3 min
- Tempo do Controlador Ligado: 10 min
- Tempo do Controlador Desligado: 30 min

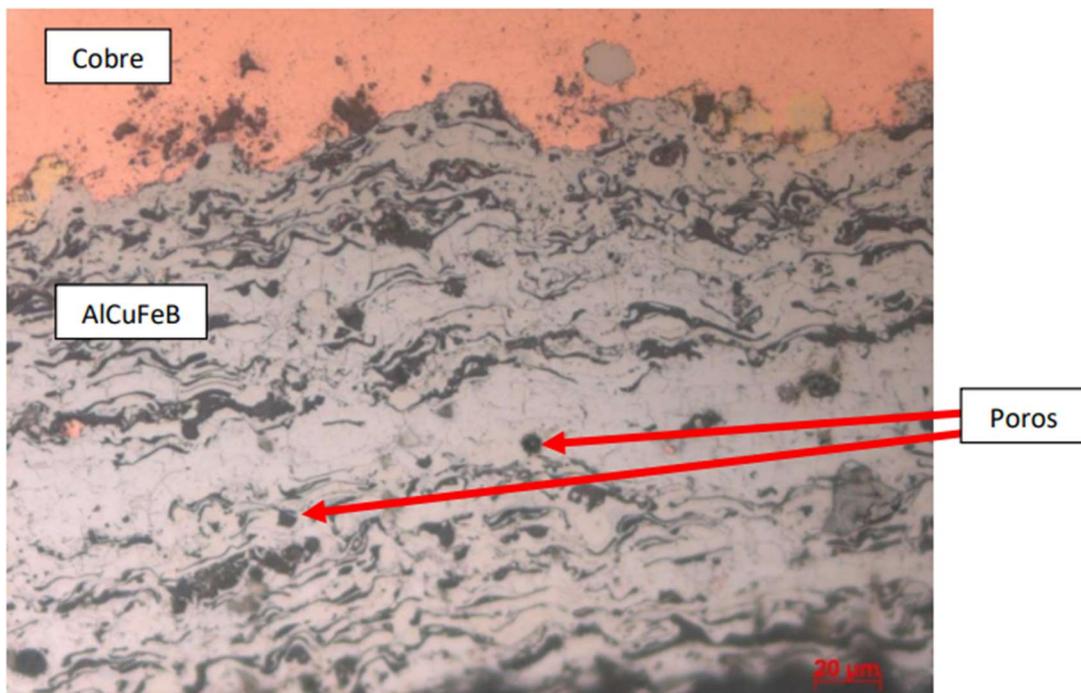
- Tempo Total de Emulação: 43 min

Para o presente trabalho foi escolhida a temperatura de 30°C para ambos o TP1 e TP2. Aqui, objetivamos observar o comportamento das ligas durante o resfriamento, e compará-las entre si, e entre as amostras de cobre, e observar onde se encontra a maior diferença de temperatura ΔT , pois assim teremos indício de uma maior tensão gerada. Cada par de amostra foi submetida ao teste por três vezes, para maior confiabilidade no resultado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Microscopia ótica

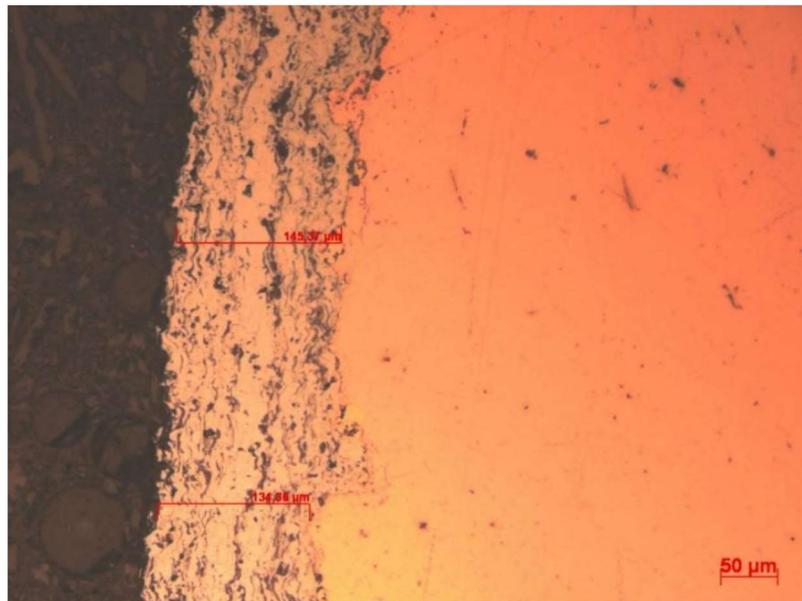
Figura 21 - Seção transversal da amostra revestida com a liga AlCuFeB



Fonte: autoria própria.

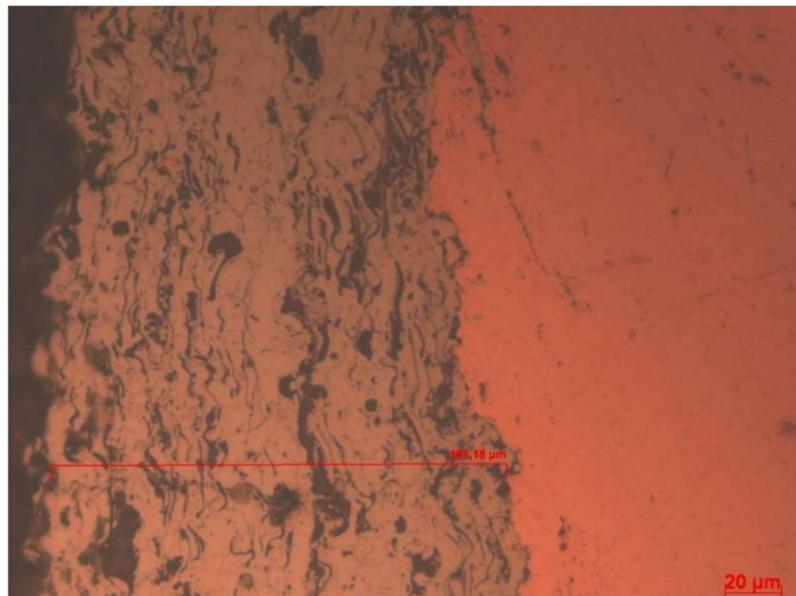
Na Figura 21, é possível visualizar o revestimento quasicristalino AlCuFeB depositado sobre o substrato de cobre, sendo examinado por meio de um microscópio óptico. A porosidade observada é intrínseca ao material devido à sua natureza frágil e também à técnica de aspersão térmica empregada. As camadas de revestimento apresentam-se uniformes, e a interface entre o substrato e o revestimento se mostra contínua e livre de falhas. A análise, portanto, nos leva a considerar essa caracterização como satisfatória.

Figura 22 - Seção transversal da amostra revestida com a liga AlCuFeB



Fonte: autoria própria.

Figura 23 - Seção transversal da amostra revestida com a liga AlCuFeB

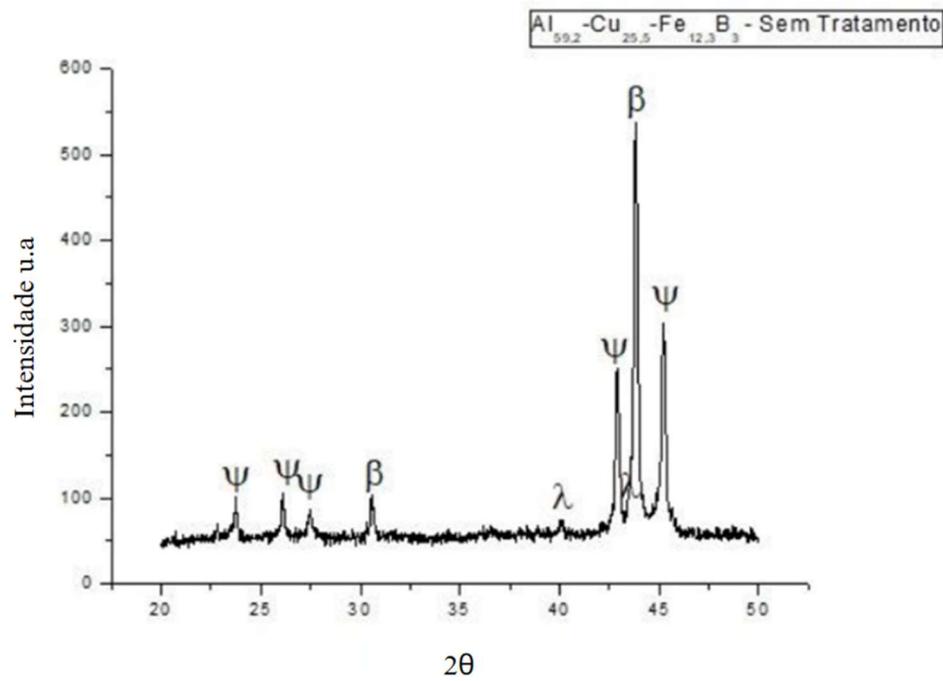


Fonte: autoria própria.

Nas figuras 22 e 23, podemos observar a espessura do revestimento quasicristalino sobre o substrato de Cobre apresentando uma média de 143,64 μm , considerada satisfatória.

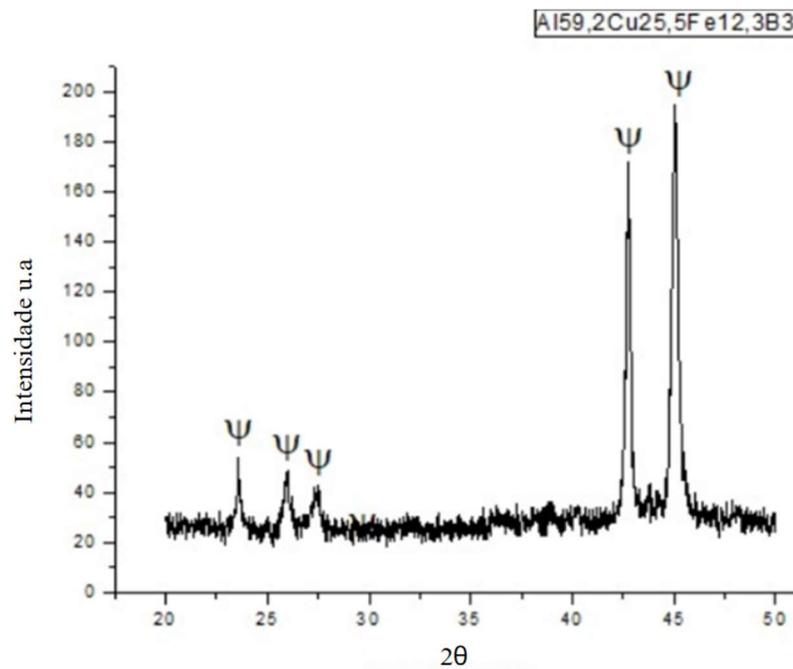
4.2 Difração de Raios-X (DRX)

Figura 24 - DRX do pó de partida do revestimento quasicristalino AlCuFeB



Fonte: autoria própria.

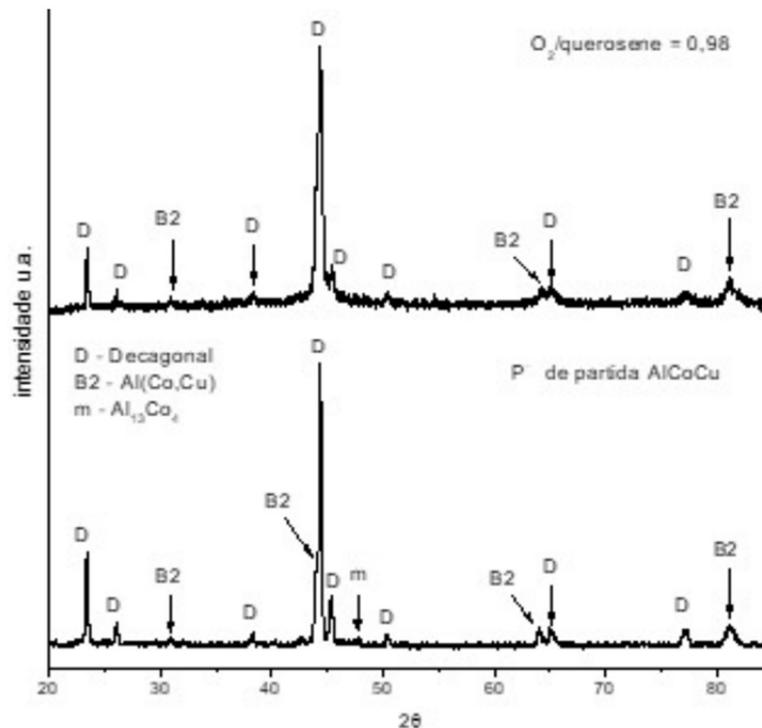
Figura 25 - DRX do revestimento quasicristalino AlCuFeB após aspensão térmica



Fonte: autoria própria.

Nas Figuras 24 e 25, observa-se os resultados do ensaio de Difração de Raios-X (DRX) realizados em uma amostra com revestimento quasicristalino AlCuFeB, antes e depois da aspersão térmica. Analisando-se o gráfico correspondente à amostra inicial do pó, é perceptível a presença proeminente de picos associados à fase icosaedral ψ e à fase cúbica β . Entretanto, quando a amostra é submetida ao processo de aspersão, o pico que corresponde à fase β sofre um processo de desestabilização, levando a uma redução em sua intensidade. O que permanece são apenas os picos que correspondem à fase ψ , sendo que os dois últimos apresentam um aumento em suas intensidades. Essa mudança indica claramente a transformação da amostra para um estado quasicristalino.

Figura 26 - DRX do revestimento quasicristalino AlCuCo



Fonte: FEITOSA (2018).

Na Figura 26, vê-se o resultado do ensaio de Difração de Raios-X (DRX) realizado no revestimento quasicristalino AlCuCo. O gráfico inferior retrata a análise da amostra de pó inicial, enquanto o gráfico superior representa a amostra após ter sido aspergida sobre um substrato de cobre puro. No primeiro gráfico, são identificadas as fases cristalinas D (decagonal), B2 (Al(Co,Cu)) e m (Al₁₃Co₄). Após a aplicação do revestimento por aspersão,

observa-se no gráfico superior a ausência do pico correspondente à fase m ($\text{Al}_{13}\text{Co}_4$) e o segundo pico da fase B2.

4.3 Microdureza Vickers

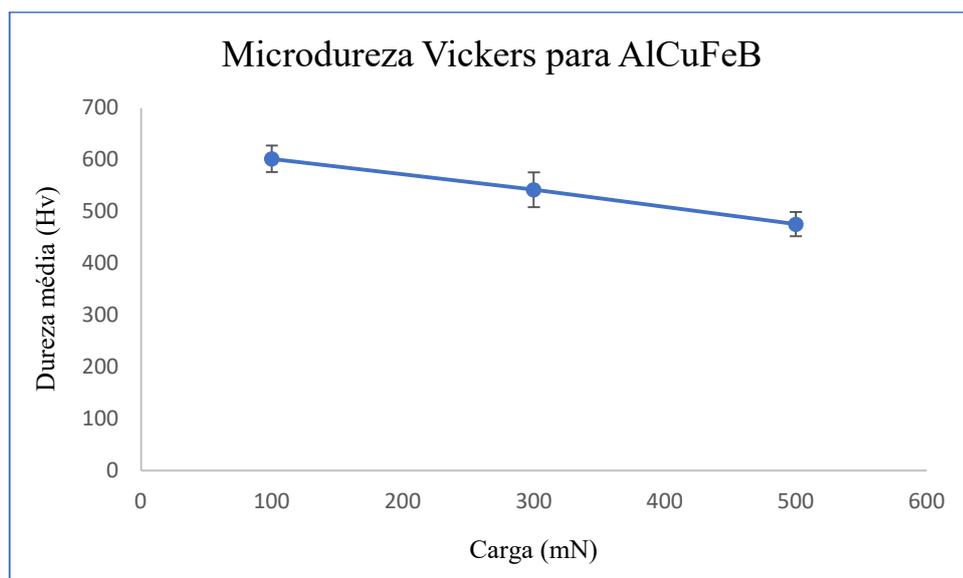
Tabela 2 - Valores médios obtidos por Microdureza Vickers na amostra AlCuFeB

Carga (mN)	Dureza média (Hv)	Desvio (Hv)
100	602,0	51,0294
300	542,0	67,1327
500	475,8	46,5532

Fonte: autoria própria.

Uma vez que os quasicristais são intrinsecamente porosos, os resultados de dureza podem exibir variações dependendo da região onde a indentação é realizada. No caso de a indentação ocorrer sobre um poro, a dureza aparente será inferior ao valor real, resultando em uma diversidade nos resultados da dureza Vickers. Contudo, os valores obtidos no teste (Tabela 2) estão em consonância com as informações da literatura: os quasicristais demonstram uma dureza notavelmente alta, comparável à de materiais cerâmicos.

Gráfico 1 - Microdureza Vickers para AlCuFeB



Fonte: autoria própria.

4.4 Molhabilidade

Figura 27 - Gota de água destilada em amostra da liga AlCuCo



Fonte: autoria própria.

Figura 28 - Gota de água salina em amostra da liga AlCuCo

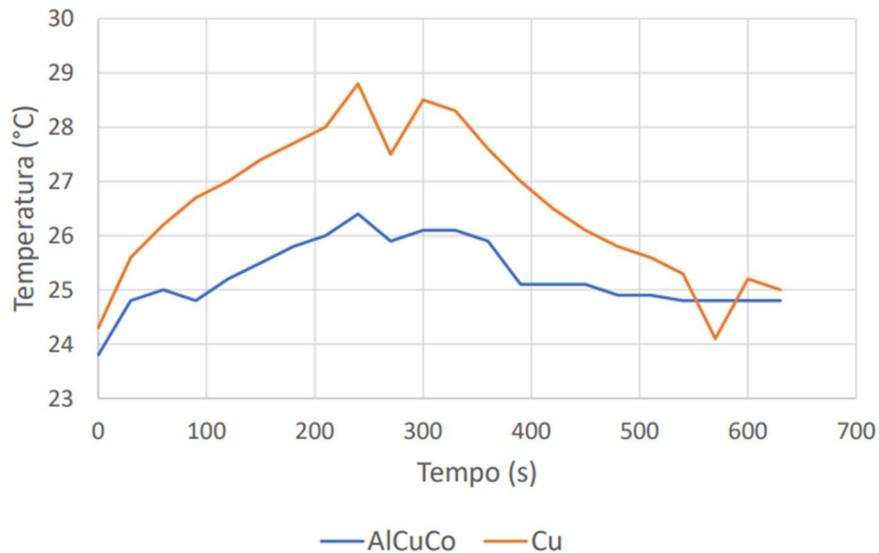


Fonte: autoria própria.

As figuras 27 e 28 apresentam as gotas de água destilada e água salina, respectivamente, depositadas sobre a superfície da amostra de AlCuCo durante a realização do ensaio de molhabilidade, efetuado no LSR/CT. A média dos ângulos formados pelas gotas, calculados por meio do software Surftens, foi de $110,6^\circ$ para a água destilada, e $116,8^\circ$ para a água salina. Dado que os ângulos medidos foram superiores a 90° , isso demonstra a propriedade hidrofóbica do quasicristal para com ambos os líquidos.

4.5 Ensaio de Temperatura

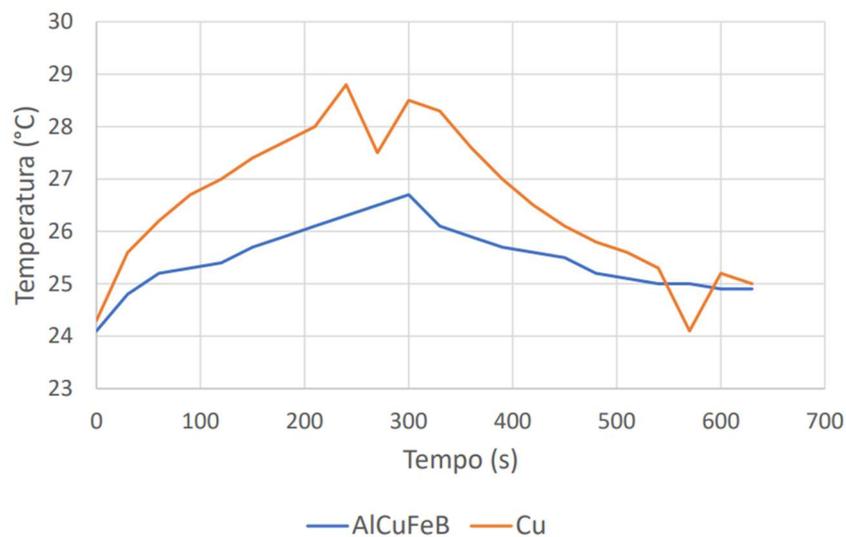
Gráfico 2 - Análise de temperatura no decorrer do tempo da liga AlCuCo vs Cu puro



Fonte: autoria própria.

A partir do gráfico 2, obtém-se a temperatura no decorrer do tempo da liga de AlCuCo e comparada com Cu puro. Observa-se que a temperatura na amostra de Cu aumenta mais rápido que no QC, atingindo uma temperatura maior em mesmo tempo. Entretanto, a sua temperatura cai mais rapidamente. Portanto, podemos dizer que o o QC retém calor por mais tempo.

Gráfico 3 - Análise de temperatura no decorrer do tempo da liga AlCuFeB vs Cu puro



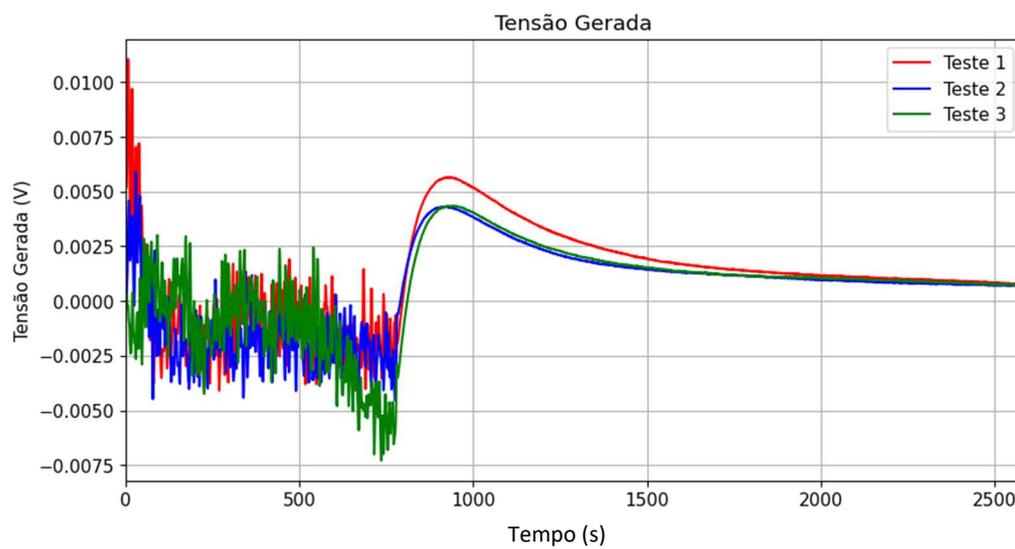
Fonte: autoria própria.

Para a amostra de AlCuFeB (Gráfico 3), pode-se observar o mesmo padrão ocorrido na amostra de AlCuCo. Logo, pode-se concluir que, novamente, o QC reteve calor por mais tempo que o Cu.

4.6 Emulação de Padrões Térmicos

4.6.1 Cu(1)-Cu(1)

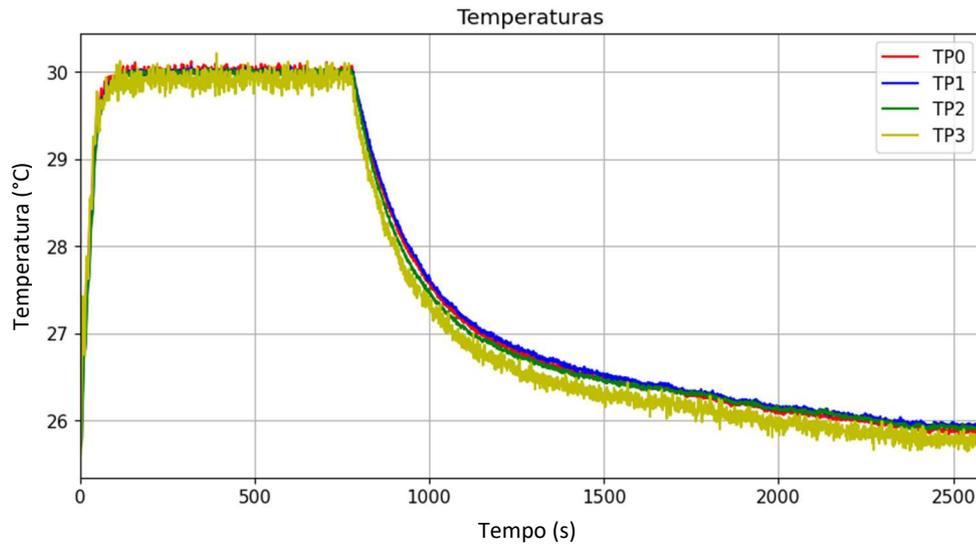
Gráfico 4 - Tensão Gerada Cu(1)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

Como ilustrado no gráfico 4, cada par de amostras passou por três testes para validação e maior confiabilidade nos resultados da plataforma. Assim, pôde-se obter os pontos médios para temperatura de cada experimento.

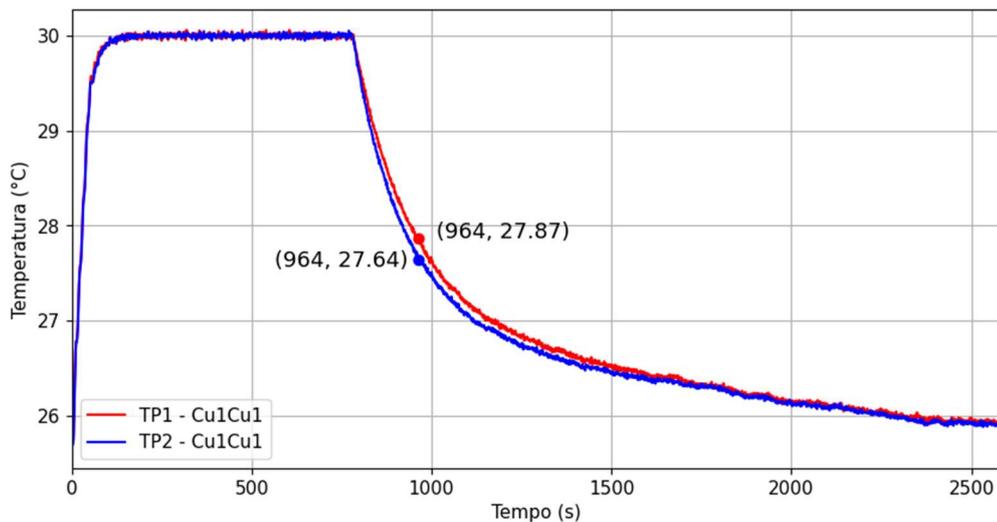
Gráfico 5 - Temperaturas Cu(1)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

No gráfico 5, podemos observar que as temperaturas TP1 e TP2 permanecem bastante próximas, o que é esperado, dado que se trata de um mesmo material, com uma mesma espessura. Nesse mesmo gráfico, observa-se a distinção dos três tempos da emulação: (i) o tempo transitório, onde há o aumento de temperatura; (ii) o tempo em que o controlador está ligado, onde o gráfico se mantém aproximadamente constante; (iii) e o tempo em que o controlador é desligado, quando a temperatura cai.

Gráfico 6 - Diferença de Temperatura Cu(1)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

O gráfico 6 permite a análise dos pontos máximos e mínimos relacionados à temperatura. Segue abaixo:

Bloco Superior:

- Ponto Mínimo: 25.71 °C
- Ponto Máximo: 30.06 °C

Bloco Inferior:

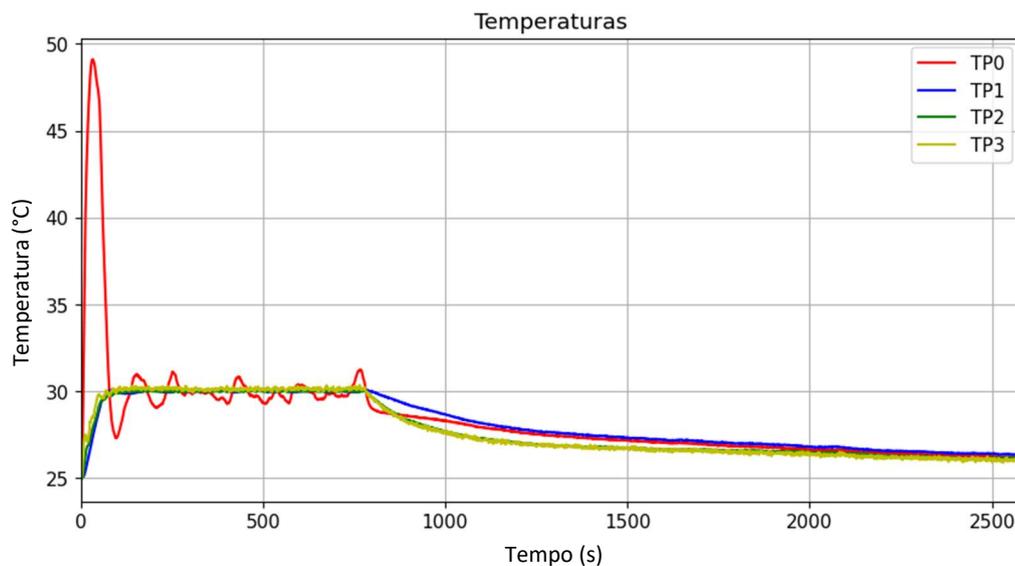
- Ponto Mínimo: 25.67 °C
- Ponto Máximo: 30.05 °C

Diferença de Temperatura:

- Ponto Máximo: 0.2277 °C, no tempo de 964 s
- Temp. Superior: 27.87 °C e Temp. Inferior: 27.64 °C

4.6.2 Cu(2)-Cu(1)

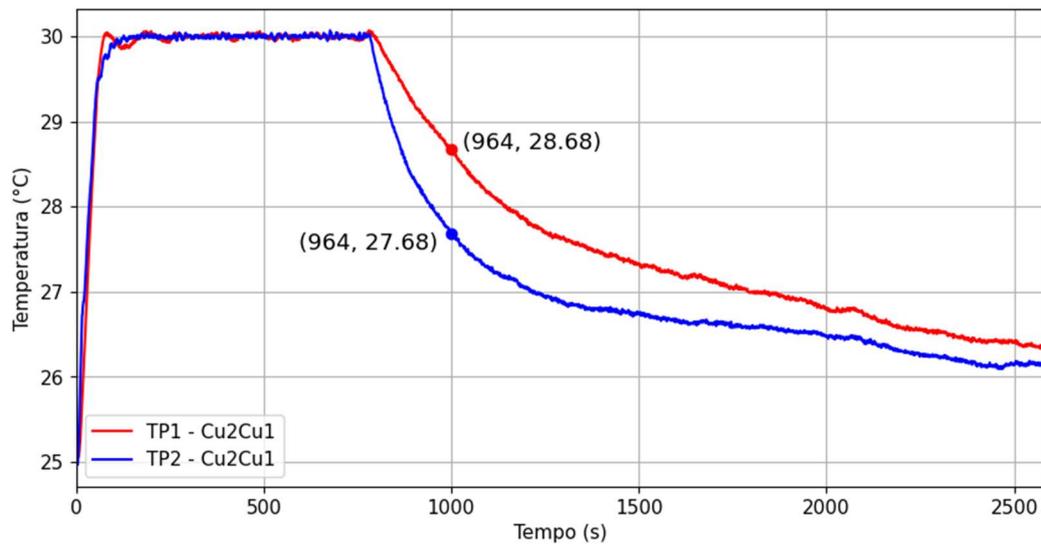
Gráfico 7 - Temperaturas Cu(2)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

No gráfico 7, podemos observar que as temperaturas TP1 e TP2 permanecem bastante próximas, o que é esperado, dado que se trata de um mesmo material.

Gráfico 8 - Diferença de Temperatura Cu(2)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

Observa-se (Gráfico 8) que os gráficos relacionados ao TP1 e TP2 ficaram mais distantes, i.e., houve um maior ΔT provavelmente relacionado à maior espessura do bloco superior em relação ao bloco inferior.

Esse gráfico nos permite fazer uma análise dos pontos máximos e mínimos relacionados à temperatura. Segue abaixo:

Bloco Superior:

- Ponto Mínimo: 25.06 °C
- Ponto Máximo: 30.07 °C

Bloco Inferior:

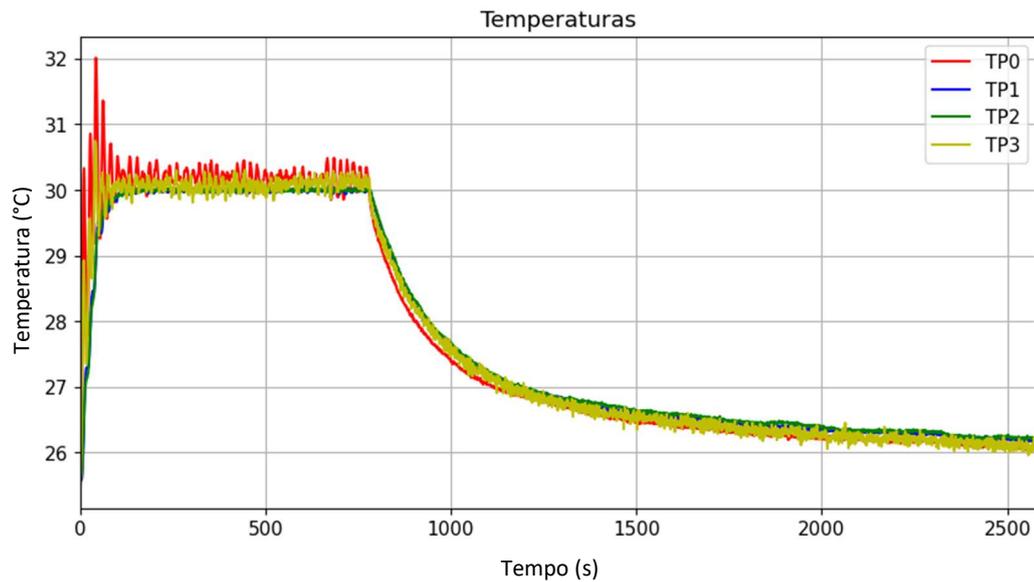
- Ponto Mínimo: 24.97 °C
- Ponto Máximo: 30.07 °C

Diferença de Temperatura:

- Ponto Máximo: 0.9953°C, no tempo de 999 s
- Temp. Superior: 28.68 °C e Temp. Inferior: 27.68 °C

4.6.3 Cu(3)-Cu(1)

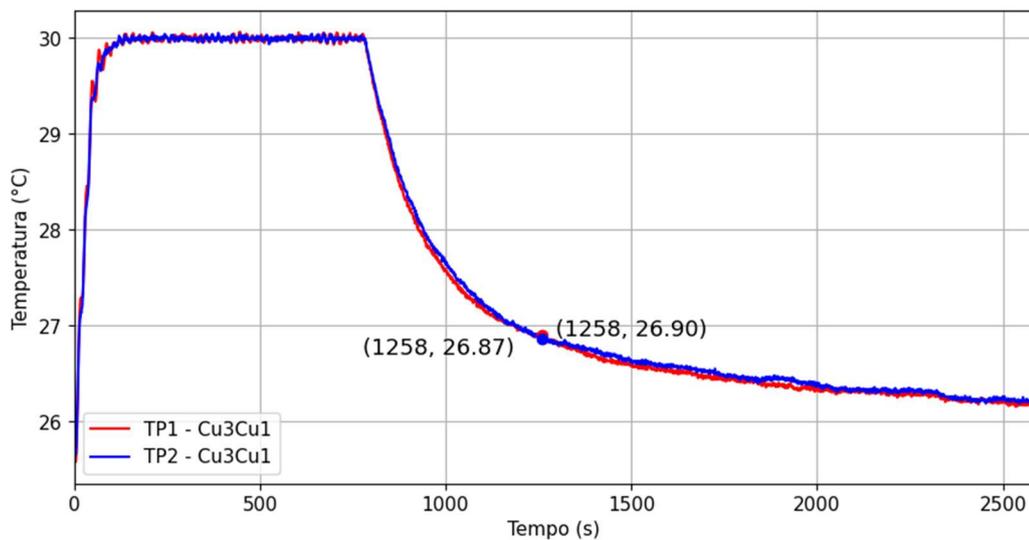
Gráfico 9 - Temperaturas Cu(3)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

No gráfico 9 observa-se que as temperaturas permanecem bastante próximas, o que é esperado, dado que se trata de um mesmo material, e com dimensões próximas.

Gráfico 10 - Diferença de Temperatura Cu(3)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

A partir do gráfico 10, obtém-se os pontos máximos e mínimos relacionados à temperatura. Segue abaixo:

Bloco Superior:

- Ponto Mínimo: 25.58 °C
- Ponto Máximo: 30.07 °C

Bloco Inferior:

- Ponto Mínimo: 25.65 °C
- Ponto Máximo: 30.05 °C

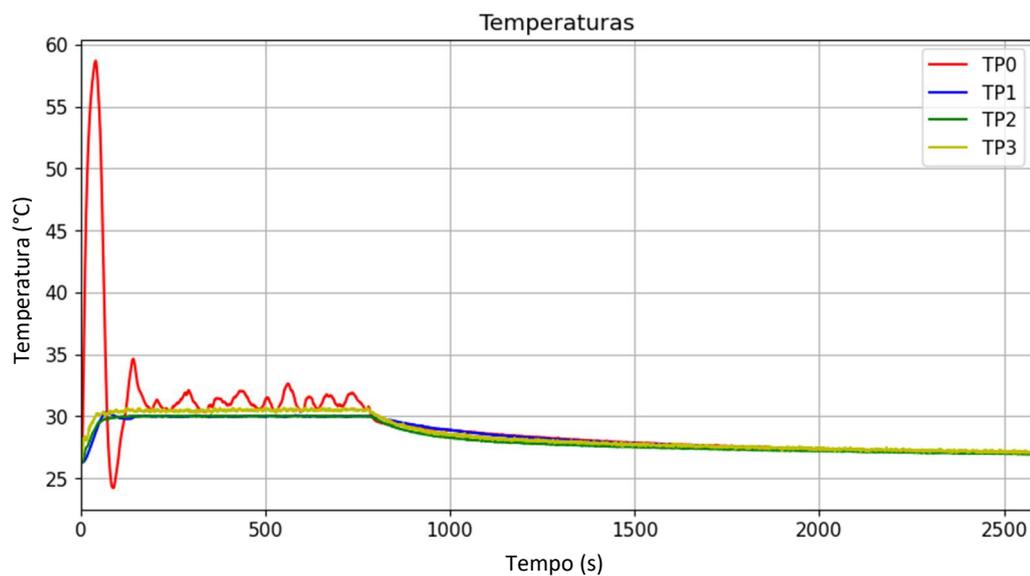
Diferença de Temperatura:

- Ponto Máximo: 0.0393°C, no tempo de 1258 s
- Temp. Superior: 26.90 ° C e Temp. Inferior: 26.87 ° C

Tem-se, portanto, um ΔT ainda menor que em relação ao primeiro par de amostras (Cu(1)-Cu(1)) que possui blocos de mesma espessura.

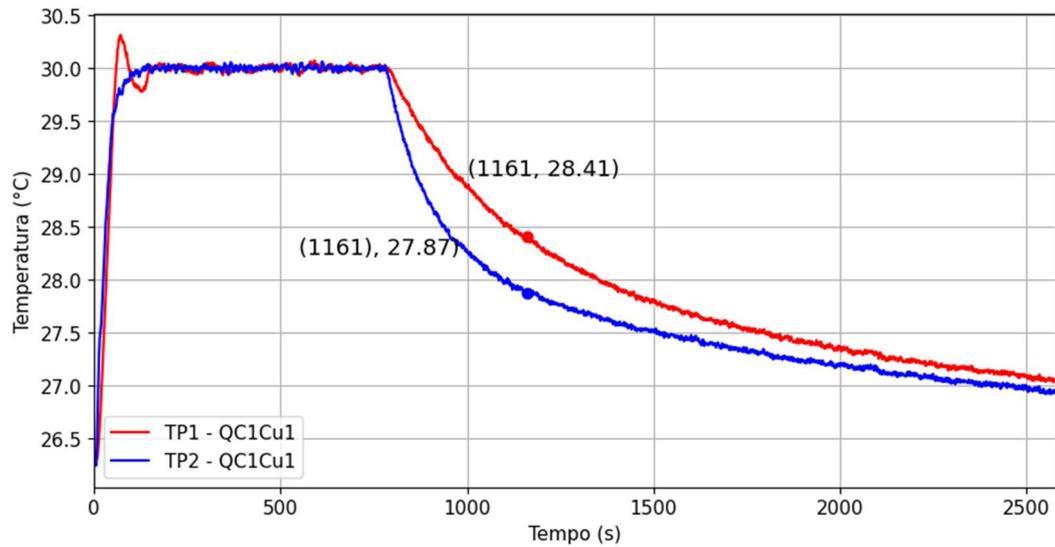
4.6.4 QC(1)-Cu(1)

Gráfico 11 - Temperaturas QC(1)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

Gráfico 12 - Diferença de Temperatura QC(1)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

A partir do gráfico 12, obtém-se os pontos máximos e mínimos relacionados à temperatura. Segue abaixo:

Bloco Superior:

- Ponto Mínimo: 26.28 °C
- Ponto Máximo: 30.31 °C

Bloco Inferior:

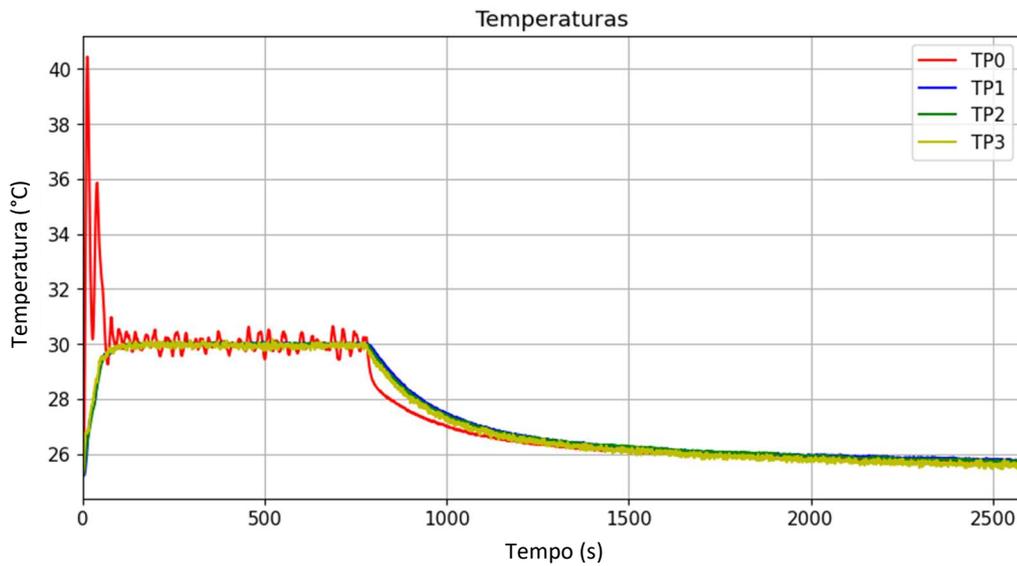
- Ponto Mínimo: 26.25 °C
- Ponto Máximo: 30.06 °C

Diferença de Temperatura:

- Ponto Máximo: 1.0210 °C, no tempo de 1161 s
- Temp. Superior: 28.41 °C e Temp. Inferior: 27.87 °C

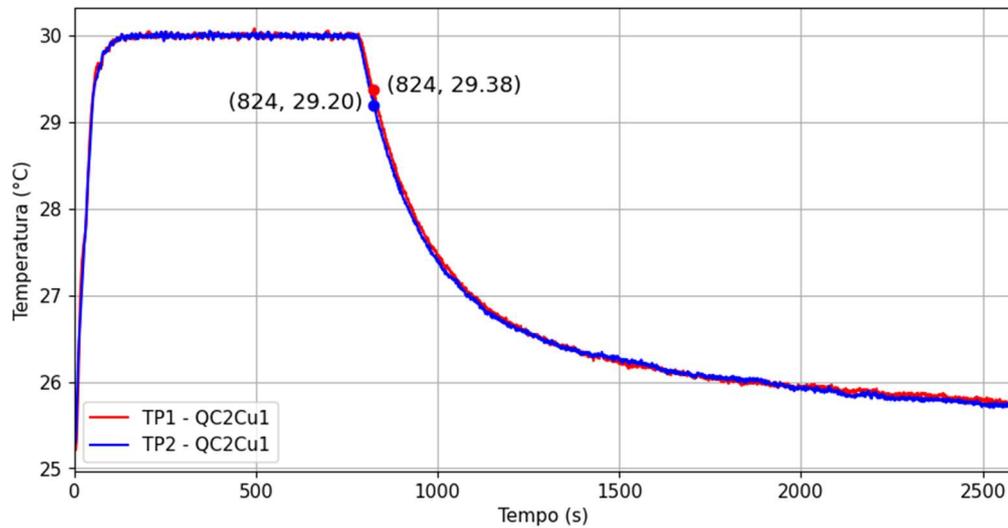
4.6.5 QC(2)-Cu(1)

Gráfico 13 - Temperaturas QC(2)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

Gráfico 14 - Diferença de Temperatura QC(2)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

A partir do gráfico 14, obtém-se os pontos máximos e mínimos relacionados à temperatura. Segue abaixo:

Bloco Superior:

- Ponto Mínimo: 25.21 °C
- Ponto Máximo: 30.08 °C

Bloco Inferior:

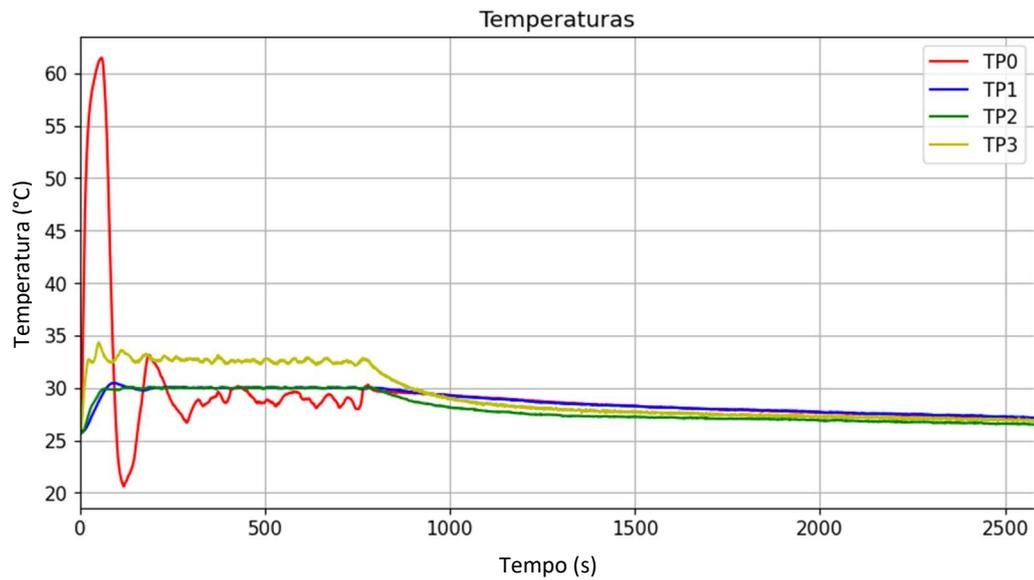
- Ponto Mínimo: 25.29 °C
- Ponto Máximo: 30.05 °C

Diferença de Temperatura:

- Ponto Máximo: 0.1723 °C, no tempo de 824 s
- Temp. Superior: 29.20 °C e Temp. Inferior: 29.38 °C

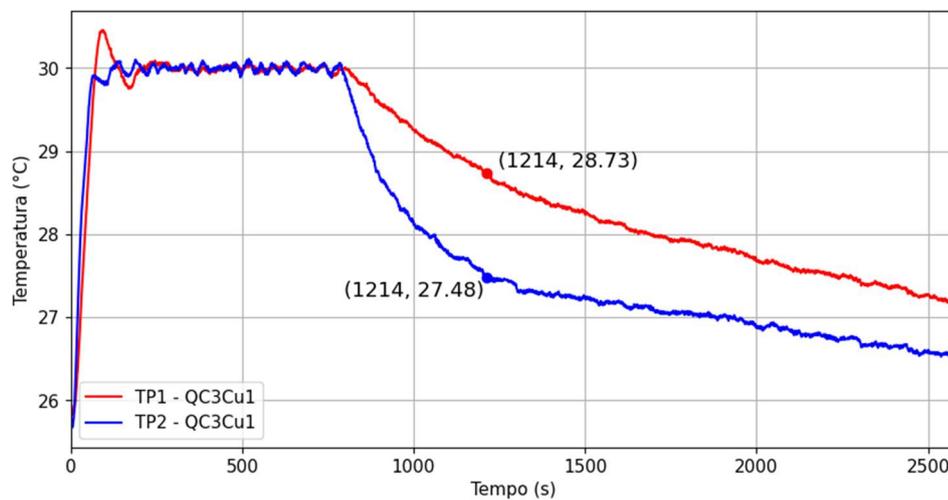
4.6.6 QC(3)-Cu(1)

Gráfico 15 - Temperaturas QC(3)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

Gráfico 16 - Diferença de Temperatura QC(3)-Cu(1)



Fonte: autoria própria.

A partir do gráfico 16, obtém-se os pontos máximos e mínimos relacionados à temperatura. Segue abaixo:

Bloco Superior:

- Ponto Mínimo: 25.83 °C
- Ponto Máximo: 30.45 °C

Bloco Inferior:

- Ponto Mínimo: 25.67 °C
- Ponto Máximo: 30.11 °C

Diferença de Temperatura:

- Ponto Máximo: 1.2510 °C, no tempo de 1214 s
- Temp. Superior: 28.73 °C e Temp. Inferior: 27.48 °C

4.7 Diferença de Temperatura (ΔT)

Para a análise comparativa dos blocos de Cobre-Cobre com Quasicristal-Cobre, foram comparadas as amostras de mesmo tamanho, ou aproximado.

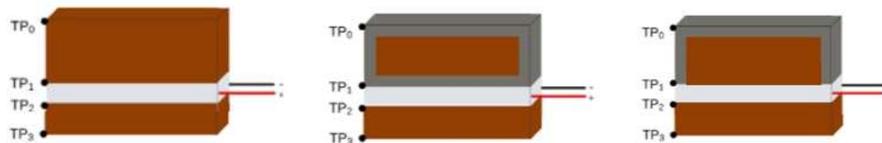
Blocos superiores

- Cu(2) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 32mm
- QC(1) - Bloco totalmente revestido (AlCuCo): 40mm x 40mm x 35mm
- QC(3) - Bloco com face não revestida (AlCuFeB): 40mm x 40mm x 32mm

Bloco inferior

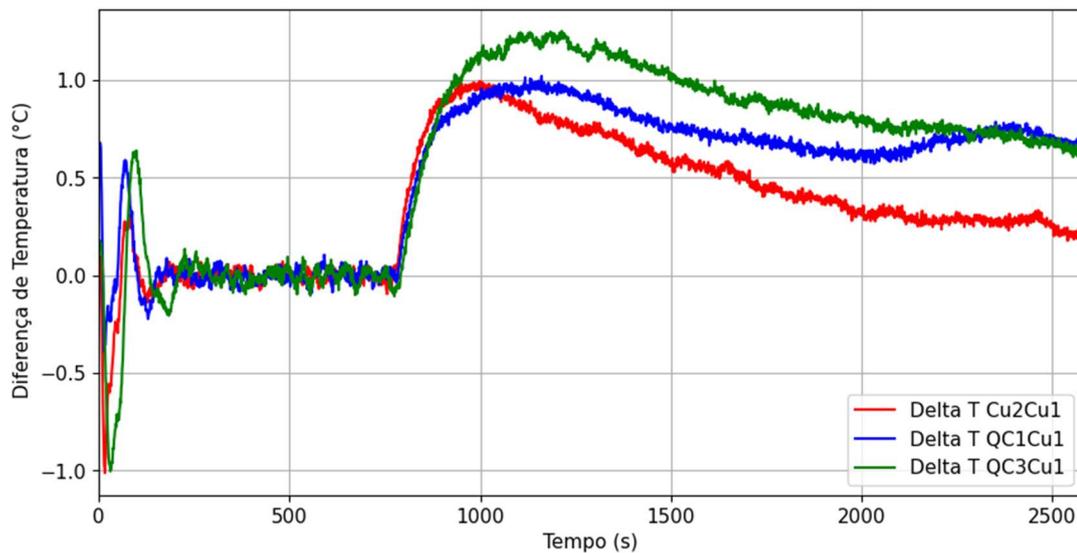
- Cu(1) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 10mm

Figura 29 - Pares de amostras com blocos de 32 e 35mm de espessura para análise comparativa



Fonte: autoria própria.

Gráfico 17 - Diferença de Temperatura dos pares de amostra com blocos de 32 e 35mm de espessura



Fonte: autoria própria.

O par de amostras que apresentou melhor resultado foi o QC(3)-Cu(1), pois este apresenta uma maior resistência térmica que os demais (Gráfico 17). Provavelmente o revestimento age como uma barreira para a perda de calor para o lado externo, e a face não revestida, por ser de cobre é um bom condutor de calor e consegue conduzir o calor para a face do TEG com mais facilidade.

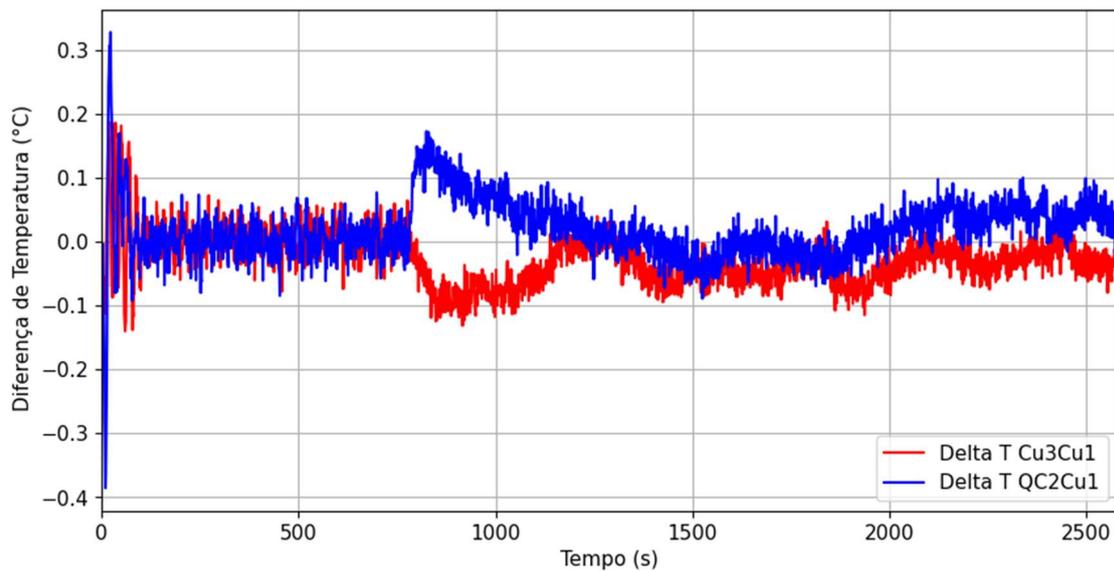
O par de amostras QC(1)-Cu(1) também apresentou um melhor desempenho do que o par composto por Cobre-Cobre, assim como era esperado e sugerido na literatura, dado que o quasicristal é um mau condutor térmico.

Figura 30 - Pares de amostras com blocos de 7mm de espessura para análise comparativa



Fonte: autoria própria.

Gráfico 18 - Diferença de Temperatura dos pares de amostra com blocos de 7mm de espessura



Fonte: autoria própria.

Para esta segunda análise, foram comparadas as amostras de mesmo tamanho.

Blocos superiores

- Cu(3) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 7mm
- QC(2) - Bloco totalmente revestido (AlCuFeB): 40mm x 40mm x 7mm

Bloco inferior

- Cu(1) - Bloco de Cobre: 40mm x 40mm x 10mm

O par de amostras QC(2)-Cu(1) também apresentou um melhor desempenho do que o par composto por Cobre-Cobre, como esperado.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, é possível inferir que:

- O processo de revestimento dos blocos de cobre com os pós das ligas compostas por AlCuFeB e AlCuCo foram bem sucedidos, e a técnica de HVOF apresentou resultados microestruturais satisfatórios;
- As características mecânicas e superficiais dos revestimentos quasicristalinos AlCuFeB e AlCuCo são consistentes com o que é apresentado na literatura. A dureza, a propriedade hidrofóbica, a baixa condutividade térmica, entre outros atributos, demonstram que as ligas estudadas são materiais com grande potencial para aplicações em colheita de energia, principalmente na área de IoT;
- Nesse estudo específico, foi confirmada a promissora aplicabilidade do bloco revestido com a liga quasicristalina como um absorvedor solar seletivo em uma colheita de energia. O material demonstrou ser mais adequado que o cobre para compor um absorvedor térmico, visto que o revestimento contribui para o aumento da resistência térmica do bloco, gerando um maior gradiente de temperatura, e por conseguinte, uma maior tensão gerada.
- Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se o estudo de superfície através do ensaio de molhabilidade da liga AlCuFeB, bem como o cálculo da energia de superfície de ambas as ligas quasicristalinas, AlCuFeB e AlCuCo.

REFERÊNCIAS

- CAMBOIN, M. M. et al. **An Automatic Emulation System for Environmental Thermal Energy Harvesting**. 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). **Anais...IEEE**, maio 2019.
- CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024.
- CHATTOPADHYAY, K. et al. **Quasicrystalline Coatings Through Laser Processing: A Study on Process Optimisation and Microstructure Evolution**. MRS Proceedings, v. 643, p. K15.3, 17 mar. 2000.
- DE LIMA, B. **Propriedades Mecânicas Da Liga Al-Cu-Fe-B Com Estrutura Icosaedral Através Da Técnica De Indentação Instrumentada**. João Pessoa / PB: Universidade Federal Da Paraíba, jul. 2011.
- DE LIMA, B. **Revestimentos Com Materiais Quasicristalinos Via Aspensão Térmica: Caracterização Tribológica E Microestrutural**. João Pessoa / PB: Universidade Federal Da Paraíba, jul. 2015.
- DUBOIS, J.-M. **Quasicrystals**. J. Phys.: Condens. Matter, v. 13, p. 7753–7762, 2001.
- DUBOIS, J.-M. **Useful Quasicrystals**. [s.l.] World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2005.
- FEITOSA, F. **Efeito Da Relação Oxigênio/Combustível Na Microestrutura E Propriedades De Revestimentos Quasicristalinos AlCuFeB e AlCoCu Produzidos Por HVOF**. João Pessoa / PB: Universidade Federal Da Paraíba, 2018.
- FREEDMAN, B. et al. **Phason dynamics in nonlinear photonic quasicrystals**. Journal of Physics F: Metal Physics, v. 18, n. 11, p. 2303–2343, 1988.
- HARB, A. **Energy harvesting: State-of-the-art**. Renewable Energy, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, out. 2011.
- HUTTUNEN-SAARIVIRTA, E. **Microstructure, fabrication and properties of quasicrystalline Al-Cu-Fe alloys: A review**. Journal of Alloys and Compounds, v. 363, n. 1–2, p. 154–178, 28 jan. 2004.

MATIKO, J. W. et al. **Review of the application of energy harvesting in buildings.** Measurement Science and Technology, v. 25, n. 1, 13 nov. 2014.

OLIVEIRA, V. et al. **A Thermoelectric Energy Harvester Based on Microstructured Quasicrystalline Solar Absorber.** Micromachines, v. 12, n. 4, p. 393, 2 abr. 2021.

OLIVEIRA, V. S. et al. **A Solar-Radiation-Powered Thermoelectric Energy Harvester based on Quasicrystal.** 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Anais...IEEE, maio 2020.

RAMADASS, Y. K.; CHANDRAKASAN, A. P. **A battery-less thermoelectric energy harvesting interface circuit with 35 mV startup voltage.** IEEE Journal of Solid-State Circuits. Anais...jan. 2011.

SHAĬTURA, D. S.; ENALEEVA, A. A. **Fabrication of quasicrystalline coatings: A review.** Crystallography Reports, v. 52, n. 6, p. 945–952, 2007.

VÉRAS, J. et al. **An Automatic Thermal Cycling based Test Platform for Thermoelectric Generator Testing.** IEEE, 2015.