



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIAS DOS MATERIAIS

BRUNO MAIA DA COSTA

Tratamento de tubos de Alumínio por PEO: uma alternativa para o desenvolvimento de superfícies seletivas de radiação empregadas em coletores solares fototérmicos.

MOSSORÓ/RN

2022

BRUNO MAIA DA COSTA

Tratamento de tubos de Alumínio por PEO: uma alternativa para o desenvolvimento de superfícies seletivas de radiação empregadas em coletores solares fototérmicos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em engenharia e ciência dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Jr.

MOSSORÓ/RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C
837
t
Costa, Bruno Maia da Costa.
Tratamento de tubos de Alumínio por PEO: uma
alternativa para o desenvolvimento de superfícies
seletivas de radiação empregadas em coletores
solares fototérmicos. / Bruno Maia da Costa
Costa. - 2022.
68 f. : il.

Orientador: Clodomiro Alves Júnior Alves.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2022.

1. alumínio. 2. superfícies seletivas de
radiação. 3. coletores fototérmicos. 4. oxidação
eletrolítica por plasma.. I. Alves, Clodomiro
Alves Júnior, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

BRUNO MAIA DA COSTA

Tratamento de tubos de Alumínio por PEO: uma alternativa para o desenvolvimento de superfícies seletivas de radiação empregadas em coletores solares fototérmicos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em engenharia e ciência dos materiais.

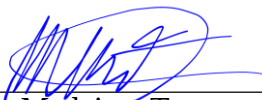
Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Jr.

Defendida em: 09/09/2022.

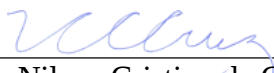
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Jr. (UFERSA)
Presidente



Dr. Matheus de Medeiros Tavares (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Dr. Nilson Cristino da Cruz (UNESP)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque ele é bom e o seu amor dura para sempre...

A minha família, benção do Senhor e combustível nesta jornada...

Ao meu orientador Prof. Clodomiro Alves Júnior pela parceria, amizade, paciência e por todo conhecimento transmitido...

Aos meus amigos da UFERSA, discentes e servidores, que ajudaram ao bom êxito deste trabalho.

“E ainda que eu tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse montanhas, mas não tivesse amor, nada seria.”

(1 Coríntios 13, 2)

RESUMO

A oxidação eletrolítica por plasma (PEO) apresenta-se como uma alternativa na criação de superfícies seletivas de radiação empregadas em coletores solares fototérmicos, visto que, no alumínio, um dos possíveis materiais utilizados na fabricação dos tubos empregados nesses sistemas, o revestimento superficial obtido apresenta resultados que vão desde o aumento da sua resistência à corrosão, e ao desgaste, boa estabilidade térmica, bem como melhorias em suas propriedades ópticas e térmicas. Nessa técnica é possível produzir uma superfície oxidada e porosa permitindo a existência de armadilhas ópticas que retêm a radiação nos poros e consequentemente aumenta absorção de calor. Entretanto, o gasto energético para sua aplicação ainda é considerado elevado para indústria. Embora o PEO possibilite o processamento de peças com geometria complexa ou de grande porte, o tratamento de superfícies tubulares, ainda é pouco explorado na comunidade científica. Este trabalho tem como objetivo revestir tubos de alumínio aplicando PEO, com a finalidade de examinar sua eficiência enquanto superfície seletiva de radiação e quais condições experimentais resultaram em melhor custo energético-benefício. Para isso, tubos de uma liga de Al 6060, com 12,7 mm de diâmetro, 1,5 mm de espessura da parede e 50 mm de comprimento foram tratados por PEO numa solução eletrolítica de silicato de sódio com uma concentração de 2 g. L⁻¹, densidade de corrente de 900 A.m⁻², utilizando uma fonte de corrente unipolar pulsada (CC), aplicando três ciclos de trabalho diferentes: 40, 50 e 60%, em tratamentos que duraram 2 e 4 min. Após aos tratamentos, as superfícies tratadas foram avaliadas quanto a sua microestrutura e propriedades ópticas. Os resultados do tratamento por PEO mostraram a formação de uma superfície porosa de Al₂O₃ sobre os tubos, cujo tamanho e distribuição de poros variaram com as condições de tratamento. Superfícies com maior porosidade apresentaram uma maior absorção térmica, enquanto a variação dos ciclos de trabalho e do tempo de tratamento, com aplicação do plasma em altas frequências, possibilitaram um controle energético do processo de maneira significativa.

Palavras-chave: alumínio; superfícies seletivas de radiação; coletores fototérmicos; oxidação eletrolítica por plasma.

ABSTRACT

Plasma electrolytic oxidation (PEO) presents itself as an alternative in the creation of radiation selective surfaces used in photothermal solar collectors, since, in aluminum, one of the possible materials used in the manufacture the tubes used in these systems, the surface coating obtained presents results ranging from increased corrosion and wear resistance, good thermal stability, as well as improvements in its optical and thermal properties. In this technique it is possible to produce an oxidized and porous surface allowing the existence of optical traps that retain the radiation in the pores and consequently increase heat absorption. However, the energy expenditure for its application is still considered high for industry. Although PEO makes it possible to process parts with complex or large geometry, the treatment of tubular surfaces is still little explored in the scientific community. This work aims to coat aluminum tubes applying PEO, in order to examine its efficiency as a selective radiation surface and which experimental conditions resulted in the best energy cost-benefit. For this, tubes of an Al 6060 alloy, 12.7 mm in diameter, 1.5 mm in wall thickness and 50 mm in length, were treated by PEO in an electrolytic solution of sodium silicate with a concentration of 2 g. L⁻¹, current density of 900 A m⁻², using a unipolar pulsed current source (DC), applying three different duty cycles: 40, 50 and 60%, in treatments that lasted 2 and 4 min. After treatments, the treated surfaces were evaluated for their microstructure and optical properties. The results of the PEO treatment showed the formation of a porous surface of Al₂O₃ on the tubes, whose pore size and distribution varied with the treatment conditions. Surfaces with greater porosity showed greater thermal absorption, while the variation of work cycles and treatment time, with the application of plasma at high frequencies, allowed a significant energy control of the process

Keywords: aluminum; selective radiation surfaces; photothermal collectors; electrolytic plasma oxidation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de irradiação horizontal global (GHI).....	18
Figura 2: Espectro eletromagnético e espectro solar.....	19
Figura 3: Irradiação solar espectral	20
Figura 4: Efeito da radiação incidente sobre a superfície de um material semitransparente	20
Figura 5: Evolução do fluxo solar incidente – Esquema interno de um coletor solar...	22
Figura 6: a) Esquema de um coletor térmico para aquecimento da água; b) componentes de um coletor solar de placa plana.....	23
Figura 7: Esquema de um absorvedor seletivo solar ideal	26
Figura 8: Representação de uma superfície texturizada e o mecanismo de aprisionamento da radiação.....	27
Figura 9: Refletividade ótica das superfícies de Si polido (Planar), comparadas com nano poros e nano fibras.....	28
Figura 10: Esquema básico do equipamento PEO	29
Figura 11: Micrografia de uma amostra de alumínio tratado por PEO	31
Figura 12: Curva da variação da tensão em relação ao tempo de tratamento e os estágios no processo PEO.....	34
Figura 13: Aparato experimental para revestimento de tubos Ti6Al4V	37
Figura 14: Esquema do aparato utilizado no tratamento PEO dos tubos de alumínio ..	40
Figura 15: Etapas realizadas para processamento com ImageJ.....	41
Figura 16: Contagem dos poros utilizando o recurso Threshold do software ImageJ	42
Figura 17: a) sistema para o ensaio da absorção térmica; b) suporte refletivo; c) detalhe interno dos termopares em contato com o fluido e paredes do tubo	43
Figura 18: Curva tensão x tempo para todas as condições.....	44
Figura 19: Ilustração do processo PEO: a) estágio 1 (antes da tensão de ruptura) - anodização convencional e início das centelhas; b) estágio 2 (após a tensão de ruptura) - ação das microdescargas de alta intensidade sobre a superfície da amostra; c) resultado da camada de óxido depositada sobre a superfície da amostra em relação à seção não tratada	45
Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura das amostras tratadas por 120 segundos: a) condição A2-40; b) condição B2-50; c) condição C2-60	47

Figura 21: Microscopia eletrônica de varredura das amostras tratadas por 240 segundos: a) condição A2-40; b) condição B4-50; c) condição C4-60	48
Figura 22: Espessura da camada obtida pelas amostras tratadas.....	50
Figura 23: a) variação da temperatura do fluido durante a exposição à luz medida pelo termopar central; b) temperatura máxima no centro do tubo após 16 min de aquecimento.	52
Figura 24: Espectro de reflectância na região UV-Vis-NIR do Al -6060 sem tratamento e tratado por PEO em diferentes condições	53
Figura 25: Curva de aquecimento das amostras C4-60 comparada com Al-Sem tratamento pintada com tinta preta fosca	54
Figura 26: Eficiência térmica do sistema de aquecimento	55
Figura 27: Espectros da radiação solar direta em relação à radiação de uma lâmpada incandescente.....	56
Figura 28: Tempos de resfriamento das amostras após o aquecimento	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição nominal dos tubos de Alumínio ABNT 6060	39
Tabela 2: Parâmetros dos processos para cada condição de tratamento.....	41
Tabela 3: Densidade de energia consumida (E) no processo PEO	46
Tabela 4: Resultados do processamento das amostras utilizando ImageJ	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CGDE	Eletrólise de descarga luminescente de contato
GHI	Irradiação horizontal global
IV	Infra Vermelho
MAO	Oxidação por micro arco
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PEO	Oxidação por plasma eletrolítico
PVD	Deposição física de vapor
SSI	Solar Spectral Irradiance
T _{off}	Pulso de corrente desligado
T _{on}	Pulso de corrente ligado Pulso
TSI	Total Solar Irradiance
UA	Unidade Astronômica
UV	Ultra Violeta
UV-vis	Ultravioleta visível Infravermelho

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
	2.1 Objetivo geral.....	17
	2.2 Objetivos específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
	3.1 Radiação solar	18
	3.2 Utilização da energia solar	21
	3.2.1 Sistemas fototérmicos para aquecimento da água	22
	3.3 Aplicações do alumínio em sistemas fototérmicos.....	24
	3.4 Superfícies seletivas absorvedoras de radiação	25
	3.4.1 Armadilhas ópticas	27
	3.5 Oxidação por plasma eletrolítico (PEO)	29
	3.5.1 Característica do filme depositado por PEO em substrato de alumínio ...	30
	3.5.2 Influência dos parâmetros elétricos e do tempo de tratamento.....	32
	3.5.3 Curva tensão x tempo	34
	3.5.4 Gasto energético do processo PEO.....	35
	3.5.5 Tratamento PEO em tubos.....	36
4	METODOLOGIA	39
	4.1 Preparação das amostras.....	39
	4.2 Tratamento PEO	40
	4.3 Caracterização das amostras.....	41
	4.3.1 Morfologia	41
	4.4 Propriedades dos revestimentos.....	42
	4.4.1 Análise térmica	42
	4.4.2 Reflectância óptica	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
	5.1 Curva tensão x tempo	44
	5.2 Energia consumida.....	46
	5.3 Caracterização dos revestimentos PEO	46
	5.3.1 Morfologia	46
	5.4 Comportamento térmico.....	51

SUMÁRIO

REFERÊNCIAS.....	59
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A comunidade científica do mundo tem concentrado seus estudos em processos econômicos e sustentáveis na geração de energia, visto que o crescimento populacional e a industrialização vêm aumentando a demanda mundial por energia (FAISAL AHMED *et al.*, 2021; KANNAN; VAKEESAN, 2016). Por essa razão, propor alternativas eficientes e sustentáveis de energia tornou-se uma das questões mais discutidas do século XXI. Pesquisas que favoreçam o desenvolvimento de energias renováveis que sejam confiáveis, econômicas e ecologicamente corretas como a energia solar, eólica, hidrelétrica e geotérmica, tornaram-se cruciais para sanar a demanda energética do futuro (ALANNE; SAARI, 2006; PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011; XU *et al.*, 2022).

Estudos revelaram que, dentre as fontes renováveis de energia disponíveis, a indústria solar seria definitivamente a melhor alternativa para a demanda futura de energia, visto que é superior em termos de disponibilidade (está presente em quase todas as regiões do mundo), custo-benefício, acessibilidade, capacidade e eficiência (KANNAN; VAKEESAN, 2016; PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011). Espera-se que os sistemas solares representem de 12% a 25% da eletricidade global até 2050 (UMMADISINGU; SONI, 2011).

A energia solar tem sido empregada basicamente para converter a radiação solar em eletricidade (fotovoltaica) e calor (fototérmica). A energia fotovoltaica consiste na transformação de energia solar em energia elétrica através do uso de painéis fabricadas a partir de materiais semicondutores, como o silício, que absorvem a luz do sol e geram energia elétrica pelo efeito fotovoltaico (KANNAN; VAKEESAN, 2016). Já conversão fototérmica de energia consiste na absorção da radiação solar pelos coletores ou concentradores solares, que utilizam placas ou tubos a vácuo, a fim de transformar essa energia em calor para aquecimento de um fluido, o qual normalmente é água ou o ar. As vantagens predominantes dessa tecnologia é a capacidade de ser empregada em quase todas faixas de temperaturas solares, podendo utilizar mais de 99% da energia da radiação solar, e seu baixo custo que favorece um potencial comercial mais amplo (DING *et al.*, 2022).

O coletor solar é o principal componente de um sistema fototérmico. Sua utilização requer materiais capazes de capturar a radiação solar e convertê-la em calor, com a máxima eficiência, para promover o aquecimento de um fluido (KALOGIROU, 2004; KANNAN; VAKEESAN, 2016; TIAN; ZHAO, 2013). Diferentes materiais são empregados na fabricação dos coletores térmicos, como vidro, cobre, aço, aço inoxidável e alumínio. Dentre todos os materiais mencionados, o alumínio possui propriedades especiais que o torna interessante para

indústria solar térmica, graças a suas propriedades de baixo peso, alta resistência, propriedades de corrosão adequadas, alta refletividade da superfície, excelentes condutividades elétricas e térmicas, bem como propriedades ópticas especiais de seu revestimento anódico (FARZANEH *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, observou-se um crescimento em pesquisas no uso do alumínio em substituição ao cobre, material já consolidado no mercado, para fabricação de tubos e outros componentes utilizados nos coletores térmicos. A principal motivação está na redução dos custos de fabricação e o aumento da eficiência térmica. A oxidação eletrolítica por plasma (PEO) apresenta ser uma técnica promissora para esse fim, por desenvolver revestimentos cerâmicos nas ligas de alumínio com boas propriedades óticas e térmicas, além de ser ecologicamente sustentável, se comparada com outras técnicas utilizadas (CERCHIER *et al.*, 2020; CLYNE; TROUGHTON, 2019). Apesar dessas características positivas, devido às altas tensões e densidades de corrente aplicadas, seu custo energético ainda é um desafio a ser vencido para aplicação industrial. Por outro lado, os eletrólitos PEO neutros e alcalinos são ecologicamente corretos e fáceis de reciclar em comparação aos ácidos concentrados usados na anodização convencional (MATYKINA *et al.*, 2017; NOMINÉ *et al.*, 2017).

Essa técnica consiste em usar um sistema como o da anodização convencional, mas aplicando voltagens maiores, entre 250 e 750 V. Devido à rigidez dielétrica do filme, cargas são acumuladas na superfície da amostra, até alcançar a voltagem de ruptura da camada óxida do metal processado, gerando plasma através de microdescargas (KLESZCZ *et al.*, 2021). Sob parâmetros adequados do processo, o PEO é capaz de depositar revestimento porosos com uma variedade de tamanho, número e distribuição (CURRAN; CLYNE, 2006; STUDENT *et al.*, 2019). A presença destes microporos sob a superfície do substrato promove o feito conhecido por armadilha óptica, capaz de aumentar eficiência térmica do material por meio da múltipla reflexão da radiação no interior das cavidades (DA SILVA *et al.*, 2017).

O tratamento de superfícies não planas por PEO ainda é pouco explorado na comunidade científica. Novas pesquisas que apresentem metodologias que favoreçam à aplicação da técnica em diferentes geometrias é importante para o avanço da sua utilização em aplicações industriais. Pelos resultados já consolidados na literatura que demonstram que os revestimentos produzidos por PEO no alumínio e suas ligas são bons absorvedores e condutores térmicos (ARAÚJO *et al.*, 2019; DA SILVA *et al.*, 2017) se faz necessário estudos que busquem aplicação deste tratamento em tubos de alumínio, visto que, esse componente é bastante utilizado na fabricação dos principais itens de um coletor solar fototérmico, como por exemplo a serpentina trocadora

de calor, as quais circulam o fluido aquecedor, e os tubos absorvedores que revestem os tradicionais tubos de cobre (FARZANEH *et al.*, 2012).

Com base nestes pressupostos, este trabalho busca tratar tubos de uma liga de alumínio por PEO, com objetivo de avaliar a energia consumida em cada processo investigado, as características das superfícies processadas (microestrutura e topografia) e a sua resposta enquanto absorção e reflectância de energia térmica. A metodologia aqui abordada utilizou altas frequências e um eletrólito à base de silicato de sódio, empregando três ciclos de trabalho distintos em tratamentos de curta duração (120 s e 240 s). Por fim, ensaios de absorção térmica serão realizados para determinar quais condições experimentais resultaram em melhor custo energético-benefício.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é desenvolver tubos de alumínio revestido com uma superfície absorvedora de alto desempenho, composta de óxido de alumínio, por meio do processo de oxidação por plasma eletrolítico.

2.2 Objetivos específicos

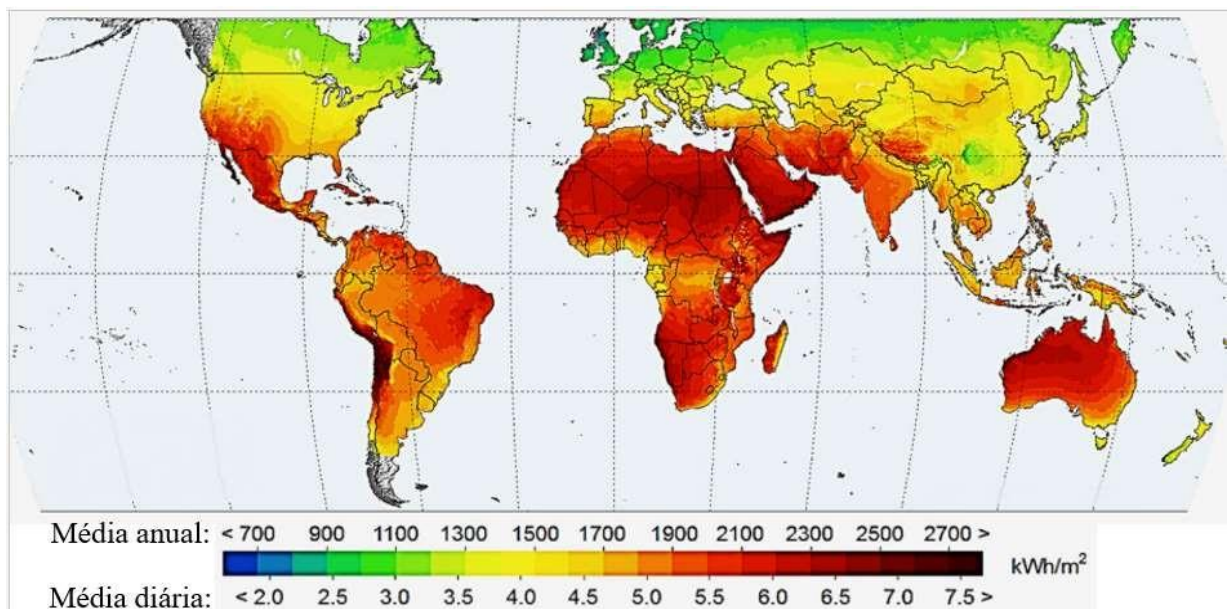
- Produzir tubos de alumínio com superfície oxidadas por plasma eletrolítico;
- Caracterizar os revestimentos PEO quanto à morfologia;
- Determinar a eficiência térmica dos tubos, comparando a superfície não tratada com a revestida de óxido cerâmico;
- Avaliar o comportamento térmico dos revestimentos PEO para um sistema de aquecimento de água.
- Analisar a energia consumida durante cada processo, para determinar quais condições experimentais resultaram em melhor custo energético-benefício.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Radiação solar

A parcela da radiação eletromagnética que diz respeito à energia radiante emitida pelo Sol é chamada de radiação solar. A intensidade dessa radiação incidente sobre a Terra corresponde uma taxa de $3,8 \times 10^{23}$ kW, dos quais aproximadamente $1,8 \times 10^{14}$ kW é absorvida (PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011; PEREIRA, 2014). Segundo Kannan e Vakeesan (2016) a distribuição da radiação solar e sua intensidade são dois fatores-chaves que determinam a eficiência da indústria solar. Esses dois parâmetros são altamente variáveis e dependem da altitude, da hora do dia e da latitude. Este efeito é devido ao aumento do trajeto nos raios quando a luz percorre obliquamente a atmosfera (DE LIMA, 1992). Com base na Fig. 1 é possível perceber as médias de intensidade de radiação em todos os continentes, onde podemos destacar o Brasil como um país promissor para utilização deste recurso na geração de energia.

Figura 1: Mapa de irradiação horizontal global (GHI)

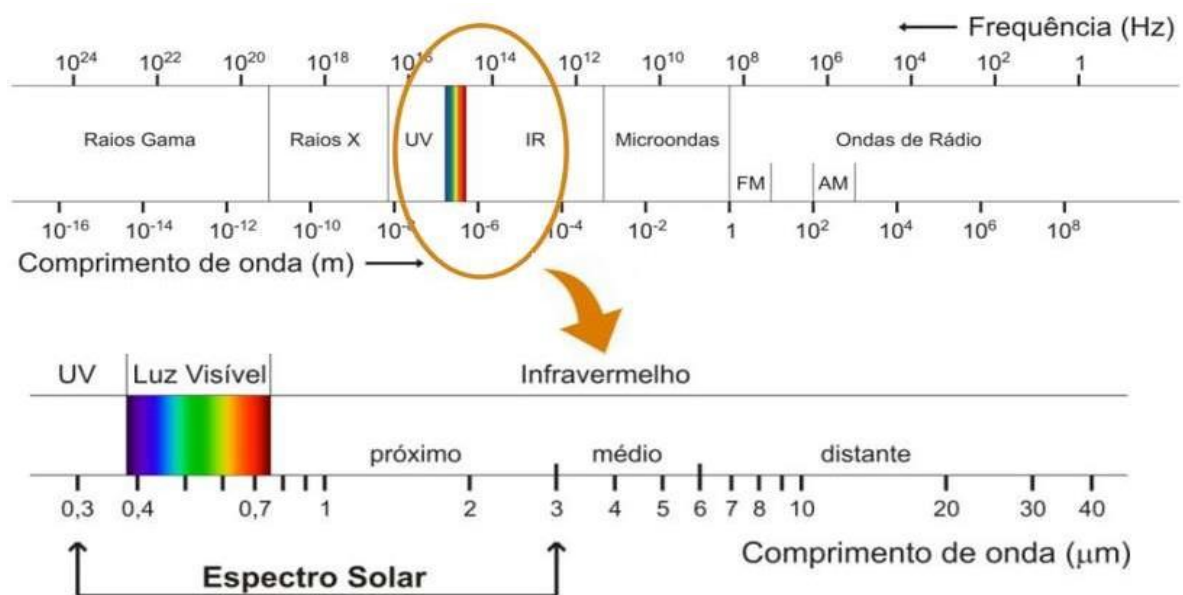


Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2017)

Também é importante definir alguns conceitos quanto ao comportamento da radiação solar, como por exemplo *irradiação* que é definida como a taxa na qual a radiação incide em

uma superfície em todos os comprimentos de onda e todas direções. A refletância à radiação solar é definida como o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Da mesma forma, a absorbância à radiação solar corresponde ao quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Já reflexão é o processo de radiação incidente sendo redirecionado para longe da superfície, sem efeito no meio (PEREIRA *et al.*, 2015). Os valores de refletância e absorbância variam de zero a um (ou de 0 a 100%). As medidas de radiação são denominadas como Irradiância Solar Total (TSI - Total Solar Irradiance) e Irradiância Solar Espectral (SSI - Solar Spectral Irradiance). A Irradiância Solar Total é definida como a potência total da energia proveniente do Sol por unidade de área a 1 UA (distância entre o Sol e a Terra conhecida como Unidade Astronômica). As medidas podem ser realizadas em função do comprimento de onda [$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$] e integradas para determinar a TSI (RODRÍGUEZ GÓMEZ *et al.*, 2018). A distribuição da radiação solar em diferentes comprimentos de onda é chamada de espectro eletromagnético e está dividido em diferentes faixas espectrais, conforme ilustrado na Fig. 2. Apenas uma parcela da radiação solar é emitida como luz visível, que é a única capaz de sensibilizar o olho humano e é responsável pela definição das cores. O restante é emitido como radiação infravermelha e ultravioleta, e não se relaciona com a cor do material (PEREIRA *et al.*, 2015).

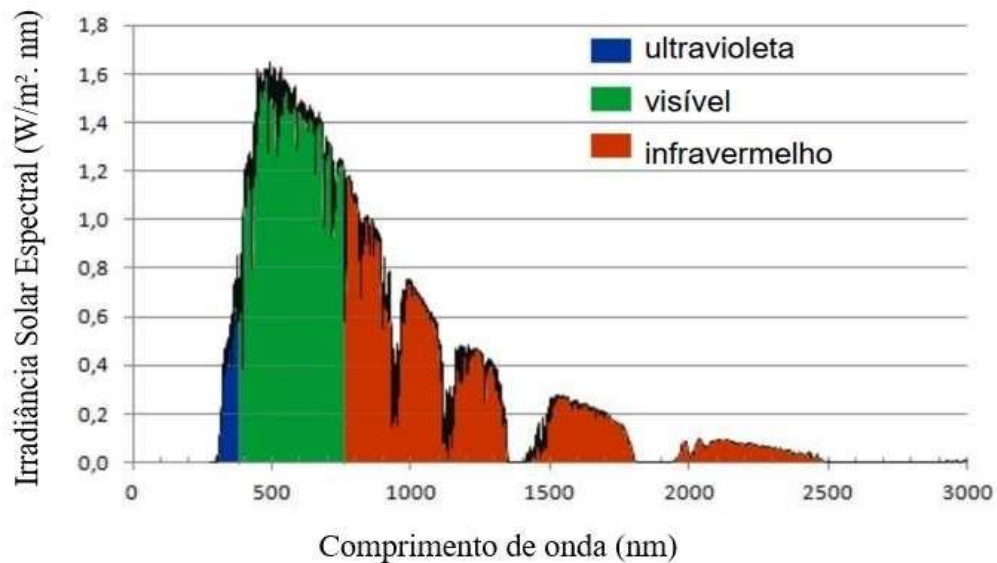
Figura 2: Espectro eletromagnético e espectro solar.



Fonte: Pereira *et al.*(2015).

A radiação solar é predominantemente térmica visto 59% da sua energia se situa no infravermelho (I.V.). Do restante da energia, 40% é radiação luminosa (visível) e 1% ultravioleta (U.V.) (DE LIMA, 1992). As regiões com os comprimentos de onda que são mais relevantes para atmosfera terrestre estão listradas na Fig. 3 Portanto, essa faixa espectral é importante para os estudos sobre aproveitamento da energia solar.

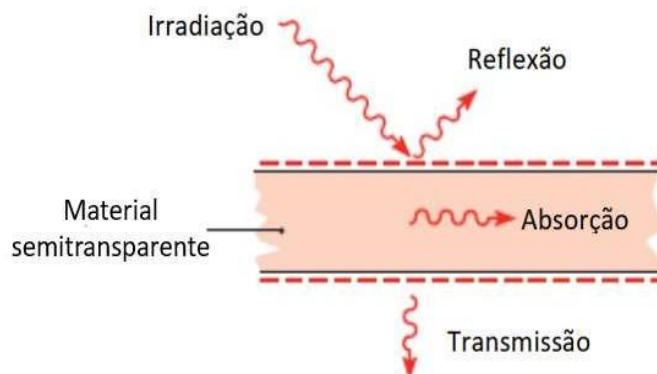
Figura 3: Irradiação solar espectral.



Fonte: Pereira (2014)

Quando a radiação incide sobre uma superfície, parte é absorvida, outra é refletida, e a parte restante, se houver, é transmitida conforme ilustrado na Fig. 4. Para superfícies opacas, a transmitância é considerada igual a zero.

Figura 4: Efeito da radiação incidente sobre a superfície de um material semitransparente.



Fonte: Pereira (2019).

3.2 Utilização da energia solar

A energia solar tem sido empregada basicamente para converter a radiação solar em eletricidade (fotovoltaica) e calor (fototérmica). A energia solar fotovoltaica consiste na transformação de energia solar em energia elétrica através do uso de painéis fabricadas a partir de materiais semicondutores, como o silício, que absorvem a luz do sol e geram energia elétrica pelo efeito fotovoltaico (KANNAN; VAKEESAN, 2016). Segundo Ding *et al* (2022) esse sistema possui um maior escopo de aplicações e tem atraído grande atenção da indústria de energia. No entanto, como o processo de preparação de semicondutores é complexo, os custos de produção são elevados; além disso, vários semicondutores são tóxicos, deixando sua produção com efeitos negativos ecologicamente. Por um outro lado, conversão da energia solar em energia térmica consiste na absorção da radiação pelos coletores ou concentradores solares, que utilizam placas ou tubos a vácuo, a fim de transformar essa energia em calor para aquecimento de um fluido, que normalmente é água ou o ar. As vantagens predominantes da tecnologia fototérmica é a capacidade de ser empregada em quase todas faixas de temperaturas solares, podendo utilizar mais de 99% da energia da radiação solar, e seu baixo custo que favorece um potencial comercial mais amplo (DING *et al.*, 2022).

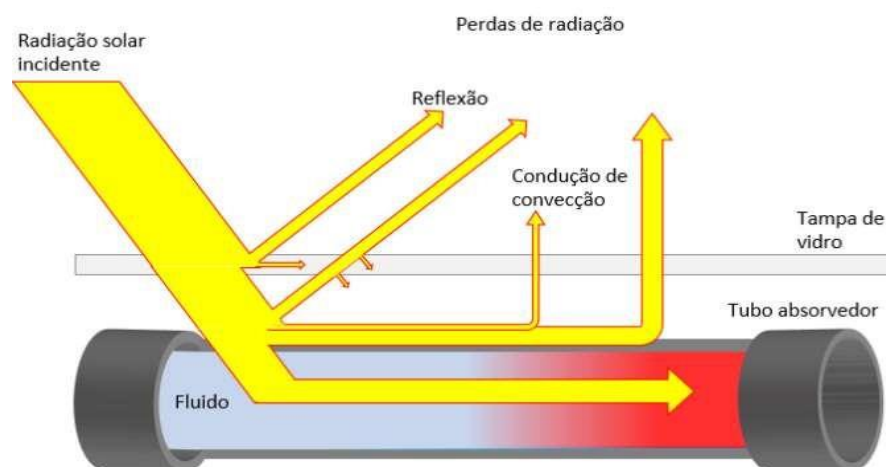
A energia solar é utilizada para fins residenciais, comerciais, industriais e agrícolas (CANDANEDO; ATHIENITIS, 2009; LINGAYAT; BALIJEPALLI; CHANDRAMOHAN, 2021; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; MOHAMMED; HAMAKHAN, 2021; SHEIKH, 2008). Em aplicações residenciais essa fonte de energia é aplicada para o aquecimento e resfriamento de edifícios (SHOEIBI *et al.*, 2022). Na indústria é empregada na geração de calor, refrigeração de alimentos, aquecimento de água, destilação da água do mar, secagem, cozimento, geração de energia, entre outros processos (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; SHARMA *et al.*, 2017). Já na agricultura é utilizado na construção de sacadores que utilizam a radiação solar para produzir ar quente destinado à secar vários alimentos e produto, em sistemas híbridos fotovoltaicos capazes de fornecer toda energia necessária para o funcionamento do sistema de refrigeração aplicado no resfriamento de estufas, e no bombeamento de água para irrigação (AL-SHAMIRY *et al.*, 2007; HASSANIEN; LI; DONG LIN, 2016; SRINIVASAN; RABHA; MUTHUKUMAR, 2021). Destaca-se entre os sistemas fototérmicos, pela sua alta eficiência e baixo custo, o sistema de aquecimento da água.

3.2.1 Sistemas fototérmicos para aquecimento da água

O sistema de aquecimento solar da água é uma das melhores aplicações em tecnologias renováveis de energia. Destaca-se pela sua alta capacidade em converter a radiação solar em energia térmica, podendo alcançar uma eficiência de até 70% quando comparada aos sistemas fotovoltaicos diretos que possuem eficiência de 17%, sendo considerada a alternativa mais econômica dentre todas as tecnologias solares atualmente disponíveis (FAISAL AHMED *et al.*, 2021; JAISANKAR *et al.*, 2011; JAMAR *et al.*, 2016; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011). Desde 1980 a utilização de sistemas solares para aquecimento da água, obteve uma taxa de crescimento anual de 30%, ficando claro que o uso dessa tecnologia se tornou economicamente viável em muitas partes do mundo (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; MOHAMMED; HAMAKHAN, 2021).

O coletor térmico é o principal componente do sistema de aquecimento solar. Suas funções básicas são aquecer o fluido e absorver o máximo de energia solar possível. Basicamente o funcionamento começa com a passagem da radiação solar pela tampa transparente do coletor. Em seguida, a superfície absorvedora coleta com a máxima eficiência a radiação solar transpassada pelos vidros, convertendo-a no calor trocando com os tubos nos quais circulam a água. Por fim, a água aquecida é armazenada em um reservatório de alto isolamento térmico (JAMAR *et al.*, 2016). Na Fig. 5 observa-se a interação do fluxo de calor sobre a superfície de um coletor.

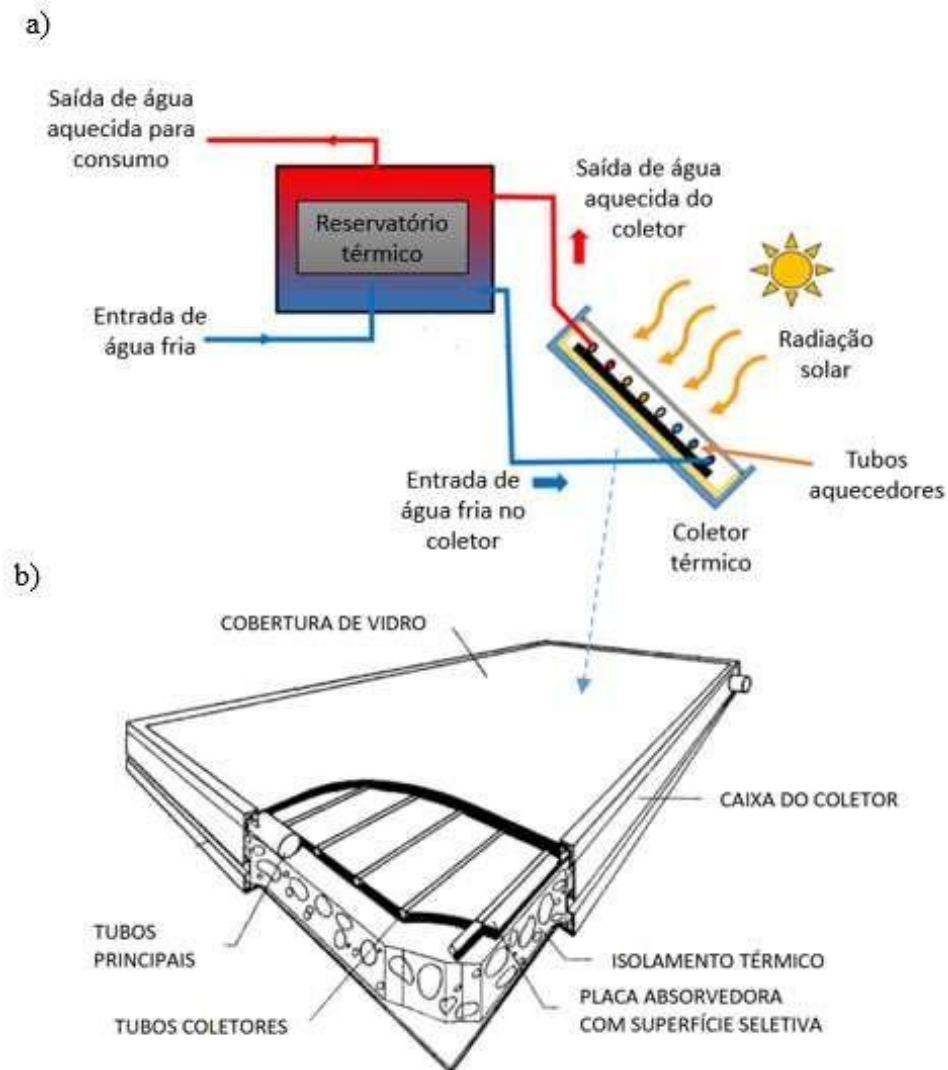
Figura 5: Evolução do fluxo solar incidente – Esquema interno de um coletor solar.



Fonte: Silva (2020).

A Fig 6a demonstra um sistema de aquecimento solar da água utilizando o tradicional coletor placa plana, enquanto a Fig 6b ilustra os seus componentes.

Figura 6: a) Esquema de um coletor térmico para aquecimento da água; b) componentes de um coletor solar de placa plana.



Fonte: Adaptado de Jamar *et al* (2016) e de Kalogirou (2004).

Embora os coletores fototérmicos tenham uma vida útil longa, há ainda alguns problemas adversos como: corrosão e entupimento dos tubos devido à acidez, alcalinidade ou dureza do fluido de transferência de calor; congelamento da água; deposição de poeira sobre a placa, o que diminui a absorção solar; e quebra do vidro por causa da dilatação térmica, granizo e vandalismo (JAMAR *et al.*, 2016). Além disso há problemas relacionados aos requisitos de projeto, como alto peso, dificuldades na montagem e instalação, resistência hidráulica e baixa

eficiência térmica de alguns modelos, inferior a 0,5 (RASSAMAKIN *et al.*, 2013). Por esses motivos, os pesquisadores buscam alternativas que possam melhorar a eficiência dos componentes utilizados na fabricação dos aquecedores solares ou novas tecnologias agregadas ao processo (FAISAL AHMED *et al.*, 2021; KANNAN; VAKEESAN, 2016). Atualmente o uso do alumínio e suas ligas na construção de componentes voltados para indústria solar vem se destacando, pelas suas excelentes propriedades ópticas (FARZANEH *et al.*, 2012).

3.3 Aplicações do alumínio em sistemas fototérmicos

A qualidade e as propriedades físicas dos materiais utilizados nos sistemas solares influenciam significativamente na sua eficiência. Diferentes materiais são usados na fabricação dos coletores fototérmicos, como vidro, aço, cobre, aço inoxidável e alumínio. Dentre todos os materiais mencionados, o alumínio possui propriedades especiais que o torna interessante para indústria fototérmica, por esse motivo cerca de 35% dos absorvedores solares utilizam alumínio em sua constituição. Destacam-se para esse fim as propriedades de baixo peso, resistência à corrosão adequadas, alta refletividade da superfície, excelentes condutividades elétricas e térmicas, bem como propriedades ópticas especiais de seu revestimento anódico (FARZANEH *et al.*, 2012). Devido a isso, o alumínio pode ser aplicado em muitas ocasiões sem nenhuma espécie de tratamento, contudo, há o interesse de se revestir sua superfície a fim de lhe atribuir novas propriedades, tais como aumento da sua resistência à corrosão, e ao desgaste, bem como melhorias em suas propriedades ópticas e térmicas (ARAÚJO *et al.*, 2019; CLYNE; TROUGHTON, 2019; MARTIN *et al.*, 2013; SHEN *et al.*, 2012).

Segundo Mok (2011) os painéis solares são melhores projetados em esquadrias de alumínio que são leves e fortes. Sua capacidade de passivação ao ar livre possibilita uma maior resistência à corrosão, o que proporciona uma vida útil em torno de 20 anos. O alumínio também é o melhor candidato na fabricação de refletores e concentradores térmicos. Ao contrário dos espelhos de vidro prateados empregados nos sistemas concentradores, os refletores fabricados em alumínio não quebram tão facilmente e são muito mais leves. Enquanto os espelhos de vidro prateados têm peso médio de 11 kg/m², os refletores de alumínio pesam aproximadamente 7 kg/m². Além disso, sua capacidade de deformação possibilita conformá-lo em geometrias espelhadas gigantes de alta eficiência de concentração solar (MOK, 2011).

Nos últimos anos, observou-se um crescimento em pesquisas no uso do alumínio em substituição ao cobre, material já consolidado no mercado, para fabricação de tubos e outros componentes utilizados nos coletores térmicos. A principal motivação está na busca de

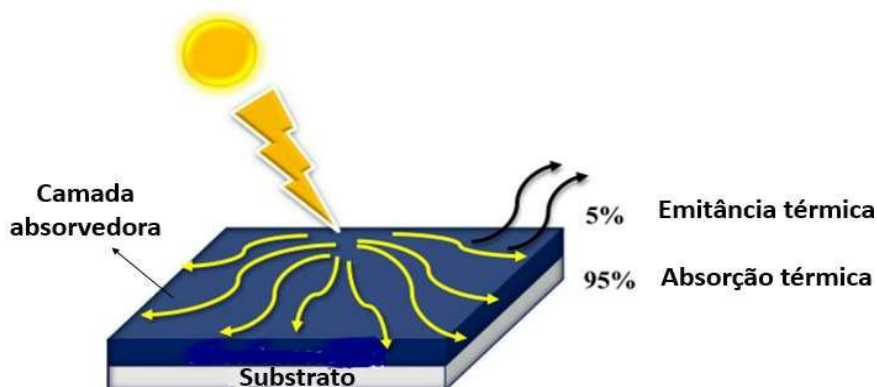
materiais que possibilitem à redução dos custos de fabricação e o aumento da eficiência térmica. Jack *et al.* (2014) apresentou uma economia de 34% quando comparou os custos de fabricação dos típicos absorvedores de fluxo direto fabricados com tubos de cobre e placas absorvedoras de alumínio, com outras configurações de absorvedores que utilizaram serpentina de alumínio revestida com tubos de calor de alumínio. Del Col *et al.* (2013) analisaram experimentalmente o desempenho de três diferentes tipos de coletores térmicos, onde constataram que o coletor de alumínio com revestimento semi-preto apresentou maior eficiência térmica do que o coletor feito de cobre com a mesma tinta preta, além de ser mais eficiente que o coletor de alumínio com revestimento seletivo. Andemeskel, Suriwong e Wamae (2017) concluíram que o desempenho térmico de um coletor solar aumentou com a diminuição da espessura do absorvedor solar de aleta de Al revestida com uma tinta seletiva preta Thurmox 250, usando uma técnica de deposição de spray com três espessuras de revestimento, obtendo eficiência máxima de próximas a 50%. Rassamakin *et al.*, (2013) estudaram a aplicação de tubos de calor feitos de liga de alumínio com aletas largas e ranhuras longitudinais. Os resultados deste trabalho mostraram uma baixa resistência hidráulica (reduzida para menos de 100 Pa), ao mesmo tempo um aumento da eficiência térmica de 72%.

O óxido de alumínio também tem sido utilizado como superfícies seletivas absorvedoras de radiação, devido suas propriedades como estabilidade química e térmica, e boa capacidade de absorver radiação, sendo assim, um material ótimo para produção de coletores solares.

3.4 Superfícies seletivas absorvedoras de radiação

As superfícies seletivas absorvedoras de radiação são consideradas o componente mais importante dos sistemas fototérmicos. Essas superfícies são utilizadas de forma eficiente para absorver a energia solar e posteriormente transferi-la para aquecimento do fluido, devido à sua alta capacidade de condução de calor (ELYASI *et al.*, 2015). Sua eficiência é aprimorada aumentando a absorção solar na região do visível ($\alpha \geq 0,95$) e reduzindo a emitância térmica o quanto possível ($\varepsilon \leq 0,05$) no comprimento de onda do infravermelho. Deste modo, as superfícies absorvedoras de radiação presentes nos coletores térmicos devem apresentar uma alta razão α/ε , onde α é absorbância e ε é a emitância (BARSHILIA *et al.*, 2011; ELYASI *et al.*, 2015). A figura 7 esquematiza a configuração de uma superfície seletiva ideal.

Figura 7: Esquema de um absorvedor seletivo solar ideal.



Fonte: Adaptado de Dan *et al.*(2017)

Como observado, absorvidade solar e a emissividade térmica são dois parâmetros importantes na caracterização de uma superfície seletiva de radiação, desta forma, deve-se buscar materiais eficientes que possibilitem o desenvolvimento de superfícies que reproduzam tais propriedades. Aplicação de revestimentos utilizando filmes cerâmicos sobre substratos metálicos é bastante estudado na literatura (BANTHUEK *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2014; KOTILAINEN *et al.*, 2015; WAZWAZ *et al.*, 2002; WU *et al.*, 2015). A principal vantagem do uso desses materiais é a sua estabilidade térmica em temperaturas elevadas (na ordem de 400°C), a qual é fundamental para aplicações em coletores solares para o uso em alta temperatura. Dentre os principais materiais cerâmicos utilizados como filme absorvedor estão o Cr_2O_3 (óxido de cromo), o Al_2O_3 (óxido de alumínio) e o SiO_2 (dióxido de silício) (BARSHILIA *et al.*, 2008; CAO *et al.*, 2014; KENNEDY, 2002; MERCS *et al.*, 2016; TESTAFAMICHAEL, 2000). Estes óxidos podem ser produzidos por diferentes técnicas, dentre as quais estão a eletrodeposição, deposição física de vapor (PVD), conversão química e anodização, dentre outras (CAO *et al.*, 2014; ELYASI *et al.*, 2015). Porém, muitos desses métodos consistem em processos caros, que envolvem altas temperaturas e/ou vácuo. Além do mais, podem agredir o meio ambiente, como na conversão química (GRANQVIST, 2012).

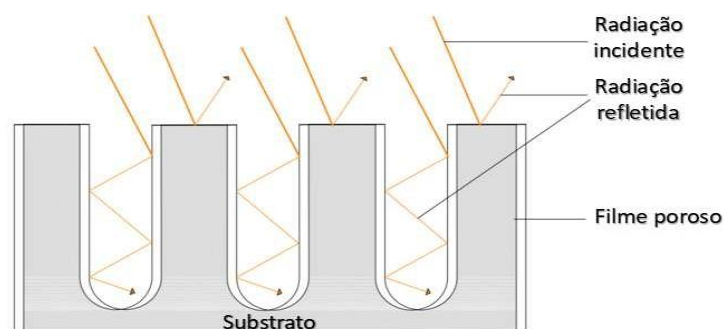
Gaouyat, Mirabella e Deparis (2013) obtiveram revestimentos de NiCrOx pulverizados por magnetron sputtering em substrato de alumínio laminado, levando a uma absorção solar de até 78%. Bilu, Mcculloch e Partridge (2012) depositaram revestimentos de óxido de alumínio usando a técnica de Arco Catódico a Vácuo Filtrado. A absorção óptica deste revestimento mostrou uma refletância próxima de zero em 450 nm, sugerindo que o mesmo pode ser adequado como um revestimento seletivo solar. Barshilia *et al.*(2011) desenvolveram um revestimento seletivo solar de nano-cermet a base de Ag- Al_2O_3 usando a técnica de

pulverização não balanceada. Após recozimento em vácuo a 400 °C por 2 h, a absorbância diminuiu de 93% para 88,7% e a emissividade térmica a 82°C aumentou de 4% para 6%, devido à desfragmentação das nanopartículas de Ag na matriz dielétrica de Al₂O₃. Elyasi *et al.* (2015) compararam a eficiência de tubos absorventes de aço inoxidável, cobre e alumínio usando métodos de eletrodeposição, conversão química, anodização e pintura. Os autores concluíram que as amostras apresentaram alta absorbância solar e baixa emitância térmica, tornando-se alternativas eficientes e econômicas para construção de coletores térmicos.

3.4.1 Armadilhas ópticas

A texturização de superfície seletivas de calor se destaca por absorver a radiação de forma física por meio da múltipla reflexão da radiação no interior de cavidades. Esse método utiliza o princípio do aprisionamento ótico da radiação solar, sendo também conhecido por armadilha óptica (PEREIRA, 2019). Conforme He *et al.* (2019) quando a luz do sol atinge os nanoporos de uma superfície com armadilhas ópticas, parte deles será absorvida, enquanto a parte restante será refletida dentro dos nanoporos e eventualmente absorvida pela superfície. Este processo pode reduzir a reflexão da luz solar da superfície para o meio ambiente e, portanto, aumentar a eficiência da absorção solar. A figura 8 ilustra ação deste fenômeno.

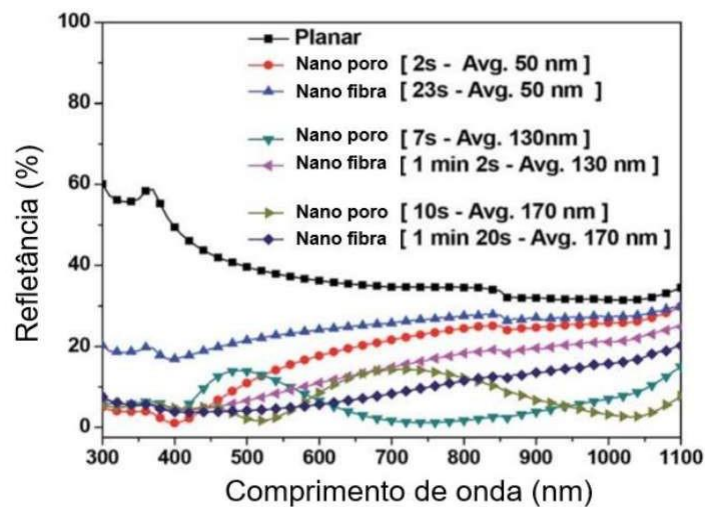
Figura 8: Representação de uma superfície texturizada e o mecanismo de aprisionamento da radiação.



Fonte: Adaptado de He et al (2019).

Resultados na redução da refletividade foram apresentados por (THIYAGU *et al.*, 2015) visualizados na Fig. 9, explorando o conceito de armadilha ótica.

Figura 9: Refletividade ótica das superfícies de Si polido (Planar), comparadas com nano poros e nano fibras.



Fonte: Thiyaagu *et al.*(2015)

Neste trabalho, a refletividade ótica em superfícies de Si foi obtida pela texturização por redução química, formando nano fibras e nano poros em sua superfície. Essas texturas foram produzidas com diferentes profundidades para a comparação com um substrato de Si polido. Pôde-se observar uma redução significativa da reflectância ótica em todos os comprimentos de onda para ambas as nanoestruturas em comparação com o substrato de Si polido.

Uma estratégia para se obter tais propriedades ópticas nessas superfícies é ajustando suas características topográficas, principalmente no tamanho e distribuição de poros (HAN *et al.*, 2007). Desse modo, a perda de calor causada pela emissão radiante infravermelha entre a superfície revestida e o ambiente é reduzida (DING *et al.*, 2022; MCKENZIE, 1979). He *et al.* (2019) revestiram folhas de alumínio com nanoporos de Al_2O_3 com diâmetros de poros de 30 nm e 400 nm através de oxidação anódica, com o objetivo de analisar o efeito deste tratamento nas propriedades de absorção solar em comparação com a folha convencional de alumínio polido. Os resultados indicaram que o tamanho dos poros influenciou significativamente no desempenho de absorção solar. A folha de alumina nanoporosa com diâmetros de poros igual a 30nm teve a maior absorvidade solar média, sendo superior em 18% que a folha de alumina com porosidade igual 400 nm e 50% maior que a folha convencional de alumínio polido.

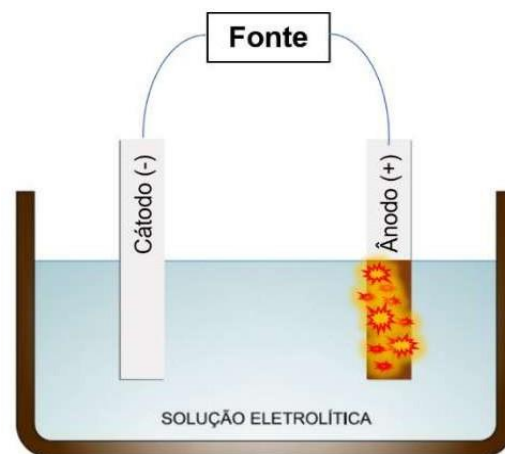
Atualmente uma técnica que tem mostrado um grande potencial para a produção de superfícies porosas de maneira controlada em substratos de alumínio e outra ligas leves é a Oxidação por Plasma Eletrolítico (PEO), conferindo aos materiais uma melhoria em suas

propriedades de resistência a corrosão, resistência ao desgaste, dureza superficial e propriedade térmicas (ARAÚJO, 2019; DEHNAVI, 2014; MARTIN *et al.*, 2013; YEROKHIN *et al.*, 1999).

3.5 Oxidação por plasma eletrolítico (PEO)

O PEO, também conhecida como oxidação por micro arco (MAO) (MARTIN *et al.*, 2013) ou eletrólise de descarga luminescente de contato (CGDE) (SEN GUPTA, 2015) é uma técnica eletroquímica de tratamento de superfície relativamente nova, com vantagens de ser econômica e ecologicamente viável, bastante empregada na limpeza, texturização e revestimento de óxidos em metais como Al, Mg, Zr, e suas ligas (MARTIN *et al.*, 2013). Contudo, pode ser aplicada a qualquer liga que possa ser anodizada convencionalmente, como por exemplo, Ta e Nb (BABAEI; FATTAH-ALHOSSEINI; CHAHARMAHALI, 2020; PETKOVIĆ *et al.*, 2011; SOWA *et al.*, 2017). Para a aplicação dos processos PEO o equipamento possui muita semelhança com o da eletrólise convencional, constituído basicamente por uma cuba eletrolítica, um par de eletrodos imersos na solução e uma fonte de tensão conectada aos eletrodos, conforme apresentado na Fig. 10.

Figura 10: Esquema básico do equipamento PEO.



Fonte: Adaptado de Jiang e Wang (2010).

Os processos eletrolíticos em solução aquosa já estão bem difundidos na literatura. No tratamento em ligas de alumínio pelo processo PEO, os modelos de formação dos micros arcos segundo Yerokhin *et al.* (2005) geralmente acontecem em três momentos que promovem: a eletrólise convencional; formação de centelhas “Sparks” e formação de micro-arcos. Além

dessas, a etapa de formação de arcos também pode ocorrer, porém não será benéfico para o revestimento devendo, portanto, ser evitada durante o processo.

O PEO consiste na aplicação de altas tensões (entre 250 a 750 V), provenientes de uma fonte corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), onde se é conectado ao ânodo a amostra que receberá o tratamento, e ao cátodo um eletrodo constituído de um metal inerte ao eletrólito. Ambos são imersos em uma solução eletrolítica alcalina, comumente contendo sais como silicatos, fosfatos, aluminatos, fluoretos, boratos e estanatos, entre outros (CLYNE; TROUGHTON, 2019; SIMCHEN *et al.*, 2020). Vários aditivos podem ser adicionados aos mesmos eletrólitos para aumentar a condutividade elétrica e a qualidade dos revestimentos cerâmicos, como introduzir certos elementos na estrutura dos revestimentos (TSAI; CHOU, 2021).

A formação do revestimento dá-se pela oxidação do substrato através da ação das descargas elétricas localizadas, denominadas micro-arcos, as quais determinam, além do crescimento do revestimento de óxido na amostra, sua estrutura, composição química e morfologia (CLYNE; TROUGHTON, 2019). A alta tensão gerada pela fonte é capaz de quebrar a rigidez dielétrica da camada de óxido formada durante o tratamento, dando origem a formação dos micro-arcos e dos gases característicos do processo, bem como uma forte luminescência que se concentra em torno da amostra. Nessa região são obtidas temperaturas extremamente altas que variam entre 800 a 20.000 K (YEROKHIN *et al.*, 1999), que levam a fundição local do substrato e da camada de óxido (Al_2O_3) formada. Este metal fundido é rapidamente resfriado pelo eletrólito dando origem a uma nova microestrutura e a formação de camadas (ou filmes) de óxido que podem chegar a 300 μm de espessura. Deste modo, tem-se a incorporação de elementos químicos do eletrólito à superfície e, ajustando-se os parâmetros do processo, pode-se modificar, além da sua composição química, as propriedades morfológicas e estruturais da superfície (SIMCHEN *et al.*, 2020).

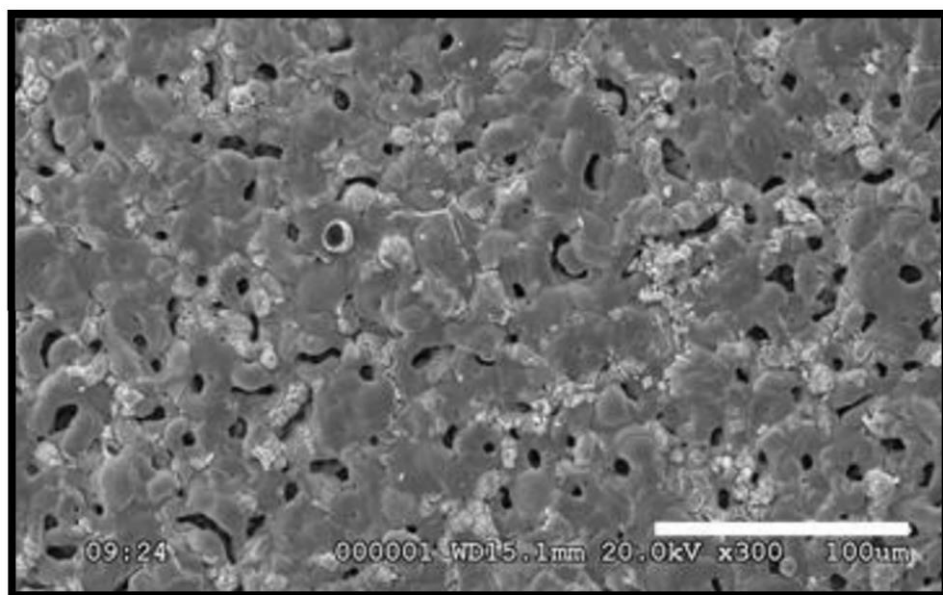
3.5.1 Característica do filme depositado por PEO em substrato de alumínio.

Para o processamento PEO em ligas de alumínio de acordo com Gu *et al.* (2007) o crescimento do filme dá-se pela oxidação do substrato de alumínio e pela incorporação de elementos da solução eletrolítica. Vários trabalhos que revestiram alumínio por PEO utilizando eletrólito a base de silicato de sódio (ANTÔNIO, 2011; ARAÚJO, 2019; DA SILVA *et al.*, 2017; DE LIMA *et al.*, 2020; LIMA, 2020) entre outros autores, perceberam que a camada

depositada possui uma fase majoritária de óxido de alumínio ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) e com picos de baixa intensidade de fase de SiO_2 . Simchen *et al.*(2020) explica que para o PEO de alumínio a presença do óxido de silício têm um efeito passivador sobre o substrato de alumínio, mas também não dissolvem a alumina formada. Isso geralmente aumenta a espessura de revestimento alcançável e resulta em uma morfologia compacta dos revestimentos.

Os filmes formados comumente aprestam uma morfologia porosa, conforme apresentada na Figura 11. Isso decorre devido ao aprisionamento do oxigênio liberado durante o processo que se dissolve pelo substrato fundido. Após este ser resfriado, o oxigênio é liberado deixando vazios na forma de crateras (CURRAN; CLYNE, 2006). O controle da microestrutura e a composição química destes filmes podem ser controlados variando alguns parâmetros envolvidos no processo tais como: parâmetros de micro-descargas de plasma; composição da liga; composição, concentração e temperatura do eletrólito; distância entre os eletrodo; e os parâmetros da corrente elétrica do PEO. A composição e concentração de eletrólitos e parâmetros elétricos usados durante o processo desempenham um papel crucial na obtenção dos revestimentos desejados com componentes de fase e microestrutura especiais (JIANG; WANG, 2010; PILLAI; RAJENDRA; SHARMA, 2018). Para este trabalho, as condições mais importantes a serem investigados é a influência do tempo de tratamento e dos parâmetros elétricos.

Figura 11: Micrografia de uma amostra de alumínio tratado por PEO



Fonte: Dehnavi (2014)

3.5.2 Influência dos parâmetros elétricos e do tempo de tratamento.

Diversos estudos afirmam que o tempo de tratamento e os parâmetros elétricos como: o tipo da corrente, tamanho do pulso, densidade da corrente, a tensão aplicada e o ciclo de trabalho, são os que mais influenciam no resultado final do revestimento formado por PEO no alumínio. Portanto, a definição desses parâmetros é determinante para o controle da espessura da camada, tamanho de poro e da porosidade dessas superfícies oxidadas por PEO (DEHNAVI *et al.*, 2013; HUSSEIN; NORTHWOOD; NIE, 2010; KASEEM *et al.*, 2021; TSAI; CHOU, 2021; WANG *et al.*, 2018; YEROKHIN, 2018).

Os tipos comuns de fontes empregadas no PEO utilizam regimes de correntes CA ou CC com pulsos unipolar ou bipolar, de modo que, cada configuração influenciará diretamente no comportamento das reações e no mecanismo de formação do filme durante o tratamento. Através do uso da corrente pulsada é possível controlar o tempo de duração das descargas, configurando o tempo em que a corrente estará ligada (T_{on}) e desligada (T_{off}), permitindo adaptação da microestrutura e composição do revestimento. Regimes de corrente pulsada CC ajudam a evitar descargas de longa duração e facilita o refinamento da morfologia do revestimento, desta maneira, a energia pode ser usada de maneira mais eficiente, reduzindo seu consumo (GAO *et al.*, 2014; JIANG; WANG, 2010; TAVARES, 2018). Yerokhin *et al.* (2005) fizeram uma comparação entre as propriedades da camada de óxido de alumínio obtidas por PEO e concluíram que o processo bipolar pulsado é capaz de melhorar a morfologia do revestimento, reduzindo a espessura da camada porosa. Hussein, Northwood e Nie (2010) compararam o tratamento PEO usando uma fonte (CC) com uma fonte com corrente unipolar (CC) pulsado, para revestir uma liga Al, utilizando uma faixa de frequência de 0,2 a 20 kHz. Os autores concluíram que o perfil de temperatura do plasma exibe um pico mais amplo para o modo de potência CC do que para o modo CC pulsado, indicando que as descargas de plasma DC proporcionariam maior tempo de sinterização. Para uma mesma frequência, empregando T_{on} maior e T_{off} menor, o resultado foi uma morfologia menos porosa, com poros de diâmetro pequeno, porém a camada de óxido ficou menos aderida à superfície do substrato. Definindo os pulsos T_{on} e T_{off} , é possível calcular o ciclo de trabalho, utilizando a equação 1.

$$\text{Ciclo de trabalho} = \left(\frac{T_{on}}{T_{off} + T_{on}} \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

Dehnavi et al. (2013) em seus estudos de a oxidação em uma liga alumínio 6061-T651 por PEO utilizando corrente pulsada, relataram que um alto ciclo de trabalho acarreta poros maiores, menor porosidade e maior incorporação de espécies do eletrólito na camada, devido as altas intensidades das microdescargas. E que baixos ciclos de trabalho proporcionavam uma superfície com pequenos poros e baixa concentração de silício uniformemente distribuído ao longo do revestimento. Egorkin *et al.* (2016) estudaram o efeito do ciclo de trabalho em ligas de magnésio por pulso bipolar, e observaram que o aumento do ciclo de trabalho levaria uma diminuição da porosidade, um aumento da espessura e da microdureza da camada depositada.

A densidade de corrente é definida como quantidade de corrente empregada pela área de substrato exposta ao tratamento. De maneira geral, a densidade de corrente é um parâmetro que deve ser controlado de modo que, para o processo PEO, os valores estejam entre 0,01 a 0,3 A/cm², visto que, altas densidades favorecem o aumento da intensidade da descarga do arco, podendo ocasionar efeitos destrutivos na camada de óxido resultando em regiões fundidas, coalescência dos poros e diminuição da espessura (KHAN *et al.*, 2010). A alteração desse parâmetro pode modificar as fases presentes na superfície, sua microestrutura, composição, taxa de crescimento e características químicas e físicas dos filmes formados durante o processo. Nos tratamentos em ligas de alumínio, o aumento da densidade de corrente melhora a taxa de crescimento do revestimento, eleva a porosidade, aumenta o tamanho de poro das superfícies tratadas, e favorece a formação da fase α -Al₂O₃ (fase da alumina termodinamicamente estável e de elevada dureza) (JIANG; WANG, 2010; YEROKHIN *et al.*, 1999; YEROKHIN; LYUBIMOV; ASHITKOV, 1998).

As altas tensões aplicadas no PEO influenciam diretamente na formação do filme. Por exemplo, em processos mais longos, onde o revestimento atinge uma determinada espessura e compactação, a alta tensão do processo irá produzir descargas de alta potência que causam a destruição do filme óxido, devendo o processo ser encerrado nesse momento (YEROKHIN *et al.*, 1999). O valor crítico de tensão está relacionado ao aparecimento dos micros arcos na superfície da amostra. Este valor é fortemente dependente das características e combinação da solução eletrolítica com o metal e, tipicamente está na faixa de 120 a 305 V (JIANG; WANG, 2010; YEROKHIN *et al.*, 1999).

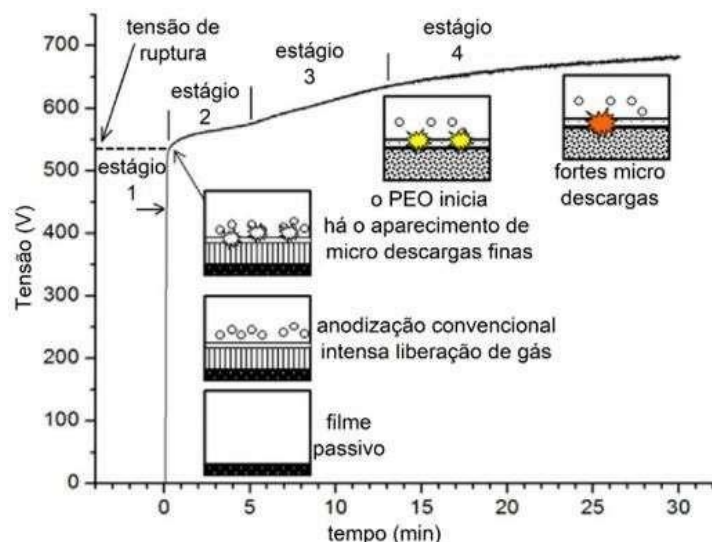
O tempo de tratamento possui uma relação direta com a espessura da camada do revestimento PEO, e uma relação inversa com o número de poros da superfície oxidada. Quanto maior o tempo de tratamento mais espessa será a camada depositada, e menor será a quantidade de poros formada (DE LIMA *et al.*, 2020; DEHNAVI, 2014; TAVARES, 2018). Com tempos maiores, a tendência é que o filme de óxido fique mais espesso e compacto, provocando o

aumento da rigidez dielétrica e consequentemente descargas de maior intensidade devem ser observadas.

3.5.3 Curva tensão x tempo

Outro ponto relevante para a discussão é o comportamento da tensão em relação ao tempo durante o tratamento PEO. Dehnavi (2014) explicou através da figura 12 este comportamento, mostrando que a curva resultante destas variáveis é composta por 4 estágios distintos. No estágio 1 a tensão sobe rapidamente, ocorrendo a anodização do substrato até que a tensão de ruptura seja alcançada. A ruptura dielétrica ocorre em locais fracos ao longo do filme de óxido acompanhado pela formação de um grande número de micro descargas finas e uniformes na superfície da amostra. As faíscas (sparks) são características do processo PEO e desempenham um papel importante na formação do revestimento. No estágio 2 a tensão continua a crescer, agora de forma mais lenta, acredita-se que isso seja causado pelo crescimento e dissolução do revestimento que ocorrem simultaneamente. No estágio 3, a taxa de mudança de voltagem aumenta ligeiramente, as micro descargas tornam-se mais intensas e duram mais. No quarto estágio, a taxa de aumento da voltagem torna-se ligeiramente mais lenta do que no estágio anterior e as faíscas tornam-se mais fortes (ANTÔNIO, 2011; DEHNAVI, 2014; TAVARES, 2018; YEROKHIN *et al.*, 1999).

Figura 12: Curva da variação da tensão em relação ao tempo de tratamento e os estágios no processo PEO.



Fonte: Adaptado de Dehnavi (2014)

É possível mensurar a energia gasta no processo calculando a integral da curva da figura 10 utilizando a equação (2) (MOHEDANO *et al.*, 2021). Onde i representa a densidade de corrente elétrica em A.m-2, V a tensão instantânea, $t(0)$ é tempo inicial, e t é o tempo final do tratamento.

$$E = \int_0^t i \cdot V \cdot dt \quad [\text{J} / \text{m}^2] \quad (2)$$

3.5.4 Gasto energético do processo PEO

É evidente que o PEO requer um maior gasto de energia devido às altas tensões e densidades de corrente aplicadas. Quando comparado com anodização convencional o tratamento PEO pode ser 20 a 30 vezes mais caros, no entanto, a taxa de crescimento do revestimento produzido é 2 a 3 vezes maior. De maneira geral, pode-se alcançar uma melhor eficiência energética, com técnicas que reduzam o tempo de tratamento, mantendo uma alta taxa de crescimento do revestimento (MATYKINA *et al.*, 2017). Uma melhor compreensão das características de descarga associadas aos parâmetros que influenciam no processo, deixaria a produção de revestimentos mais eficientes e com menor consumo energético (KASEEM *et al.*, 2021).

Para determinar a quantidade de energia consumida durante a PEO, a análise energética das descargas individuais foi realizada por vários grupos de pesquisa (CLYNE; TROUGHTON, 2019). Foi relatado que a energia de descarga típica é de ~1 mJ e a taxa de conversão entre a energia de descarga e o volume resultante de revestimento é tipicamente $\sim 10^{13} \text{ J m}^{-3}$, que também pode ser expresso como $3 (\text{kW} \cdot \text{h}) / (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ (NOMINÉ *et al.*, 2015).

Os processos de PEO (CC) e (CA) normalmente consomem de 4 a 30 (kW·h) / (m²·μm), dependendo da espessura do revestimento. Contudo foi demonstrado que os processos bipolares de alta frequência são mais eficientes em termos energéticos do que o processo (CA) (YEROKHIN *et al.*, 2005) e podem oferecer uma taxa de crescimento de revestimento de aproximadamente 3 m/min e consumo de energia de 10-15 (kW·h) / (m²·μm). Outras estratégias apresentadas na literatura para o controle da eficiência energética do processo PEO incluem adaptação da sequência de pulso e do ciclo de trabalho, distância entre o cátodo, composição do eletrólito e pré-anodização (MATYKINA *et al.*, 2017).

Gębarowski e Pietrzyk (2014) constataram que a transição para um regime de plasma com descargas suaves provocou uma queda de tensão anódica (de cerca de 480 a 370 V) reduzindo o consumo de energia em cerca de 23%. Em relação à distância entre o ânodo e o

cátodo, Zhang *et al.* (2010) estudaram a eficiência do processo utilizando um cátodo com grande formato, e concluíram que distâncias mais curtas de eletrodo reduzem a queda de tensão, chegando a 25% de economia de energia quando a distância do eletrodo diminuiu de 50 mm para 5 mm.

Uma seleção adequada da solução eletrolítica pode contribuir para reduzir o consumo de energia durante a PEO. Conforme estudado por Cheng *et al.* (2015) o processamento PEO da liga Al-Cu-Li em um eletrólito de aluminato concentrado contendo $56 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de NaAlO_2 obteve um consumo de energia de $\sim 1,5 \text{ (kW} \cdot \text{h)} / (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ em relação ao mesmo tratamento com PEO em um eletrólito contendo $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaAlO_2 que elevou o consumo de energia para $\sim 16,7 \text{ (kW} \cdot \text{h)} / (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$. Del Olmo *et al.* (2019) relataram que os valores de consumo de energia de 4,89, 4,7 e 2,2 $\text{(kW} \cdot \text{h)} / (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ podem ser alcançados, respectivamente, usando eletrólitos de aluminato de sódio, fosfato de sódio e silicato de sódio. O menor consumo de energia foi alcançado utilizando eletrólito a base de silicato, o qual foi atribuído a sua alta condutividade elétrica que garantiu menor tensão de ruptura.

Quanto à abordagem de pré-anodização, o tratamento PEO das camadas de pré-anodização pode levar a uma redução significativa no consumo de energia durante o processamento de PEO do Al. Mohedano et al (2021) que aplicou PEO em uma liga de alumínio durante 600 s com uma frequência de 50 Hz, combinando duas estratégias propostas na literatura para minimizar o gasto de energia no processo: a composição do eletrólito e o uso de um filme precursor anódico. Os melhores resultados em termos de economia de energia foram obtidos para a liga AA6082 pré-anodizada tratada com PEO na presença de polifosfato ($\sim 3,2 \text{ kW h} / \text{m}^2 \mu\text{m}$). O menos eficiente foi o ortofosfato ($\sim 9,3 \text{ kW h} / \text{m}^2 \mu\text{m}$), o que resulta em 66% de economia de energia. As taxas de crescimento do revestimento de PEO foram $\sim 1,7$ vezes maiores em amostras pré-anodizadas em comparação com PEO direto.

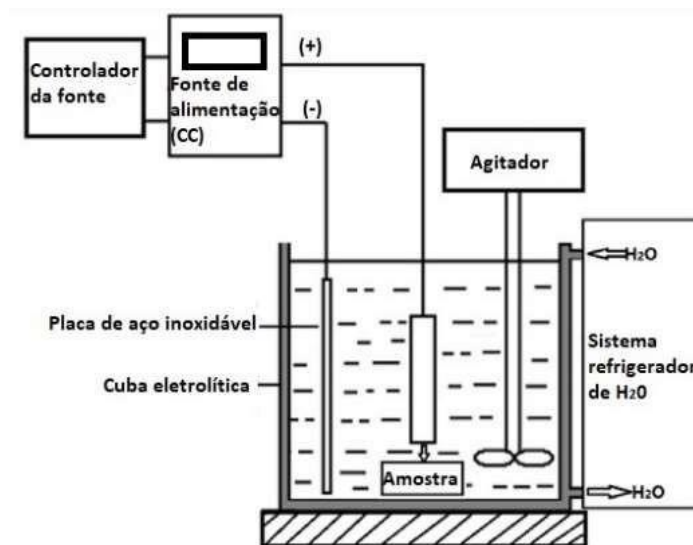
3.5.5 Tratamento PEO em tubos

Embora o PEO possibilite o processamento de peças com geometria complexa ou de grande porte, o tratamento de superfícies não planas ainda é pouco explorado na comunidade científica. Novas pesquisas que apresentem metodologias que favoreçam à aplicação da técnica em diferentes geometrias é importante para o avanço da sua utilização em aplicações industriais. Componentes tubulares são constantemente empregados na indústria petrolífera, automotiva, de climatização e refrigeração, coletores solares, entre outras aplicações. Portanto se faz

necessário buscar alternativas que possibilitem o tratamento de tubos metálicos das ligas possivelmente processados por PEO.

Liu *et al.*(2019) produziu revestimentos cerâmicos sobre a superfície de um tubo de perfuração de petróleo fabricados de uma liga de titânio (Ti_6Al_4V) por PEO no eletrólito de silicato com e sem nanofolhas de grafeno, com objetivo de melhorar sua resistência ao desgaste. Os resultados do teste de desgaste mostraram que o revestimento com nanofolhas de grafeno apresentou resistência ao desgaste extremamente significativa devido à barreira física das nanofolhas de grafeno. A figura 13 demonstra o aparato experimental utilizado neste trabalho.

Figura 13: Aparato experimental para revestimento de tubos Ti_6Al_4V



Fonte: Adaptado de Liu *et al.*(2019)

Gu *et al.* (2007) buscou tratar a superfície interna de tubos de Al por PEO de maneira que obtivesse uma camada uniforme. Os autores perceberam que a diferença de potencial no interior dos tubos sem a presença de um eletrodo central resulta em um decaimento do potencial da parte inferior para a parte central do tubo. Isso ocorre devido ao efeito de blindagem do campo elétrico, o que promove uma distribuição não uniforme dos revestimentos de PEO nessa superfície, enquanto a espessura do revestimento na superfície externa dos tubos manteve-se uniforme. Com a utilização de um fino eletrodo de aço inoxidável inserido axialmente no centro do tubo, foi possível eliminar o efeito de decaimento de potencial dentro dos tubos, obtendo-se um revestimento uniforme na superfície interna.

Neste mesmo trabalho Gu *et al.* (2007) empregou a técnica mencionada anteriormente para depositar internamente uma camada cerâmica de óxido de alumínio em um tubo de aço ABNT 1045, com 50 mm de diâmetro interno e 600 mm de comprimento. As amostras primeiramente foram processadas por imersão a quente para obter o revestimento de alumínio metalurgicamente ligado à superfície interna e, em seguida, o tratamento PEO foi aplicado para depositar os revestimentos de óxido de alumínio na superfície interna do tubo de aço.

4 METODOLOGIA

4.1 Preparação das amostras

Foram empregado neste experimento tubos de uma liga de alumínio ABNT 6060, com 12,7 mm de diâmetro externo e 1,5 mm de espessura da parede, cuja composição nominal conforme o fabricante Hyspex (2021) está informado na tabela 1. Essa é uma liga que possui como elementos predominantes em sua composição Al (99,60%), Si e Mg, possibilidade sua utilização na fabricação de tubos para irrigação e dissipadores de calor, com vantagens que incluem alta relação resistência/peso e também alta resistência à corrosão, propriedades importantes para seu emprego na indústria de coletores solares (GRESS *et al.*, 2020).

Tabela 1: Composição nominal dos tubos de Alumínio ABNT 6060

Liga	%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	I
ABNT	Min	0,30	0,10	-	-	0,35	-	-	-
6060	Max	0,60	0,30	0,10	0,10	0,60	0,05	0,15	0,10

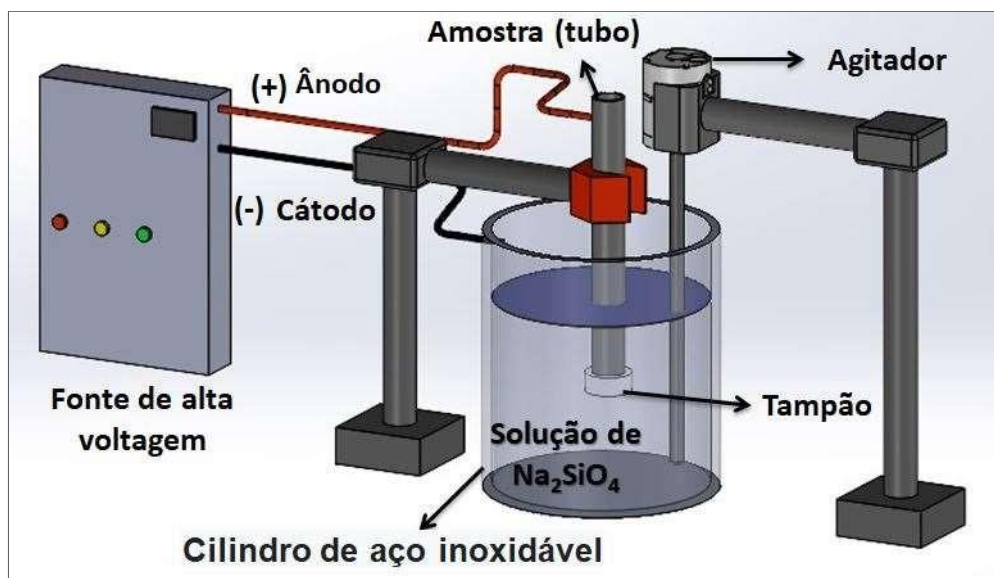
Fonte: Autoria própria

Os tubos foram cortados com 100 mm de comprimento e em seguida lixados de maneira mecânica com auxílio de um torno mecânico convencional, utilizando lixas de granulometria em ordem crescente: 250, 600, 1500 e 2000. Após o lixamento, uma lavagem foi feita com intuito de remover os resíduos e outras impurezas das amostras, utilizando uma cuba de ultrassom com solução de água destilada e detergente enzimático durante 10 min. Para se adequar as condições do experimento, dos 100 mm de comprimento útil do tubo, apenas 50 mm foram utilizados para o tratamento PEO, de modo que, após o tratamento, o tubo foi cortado para separar o segmento tratado do sem tratamento.

4.2 Tratamento PEO

O tratamento PEO foi realizado em uma célula eletrolítica composta por um recipiente cilíndrico de aço inoxidável com 14 cm de diâmetro e 10 cm de altura, contendo 1,2 L de uma solução eletrolítica de Na_2SiO_3 (2 g.L⁻¹) (Fig.11), renovada a cada tratamento. Uma fonte de corrente pulsada unipolar (CC) modelo Plasma LIITS Pulse 6 foi utilizada para geração do plasma. Como polo positivo (ânodo), foi utilizado a amostra de Al-6060, e como polo negativo (cátodo), o cilindro de aço inoxidável (célula eletrolítica). Os tempos de tratamento foram de 120 e 240 segundos; mantendo fixos a densidade de corrente de 900 A.m⁻²; temperatura ambiente de 25°C; corrente 1,8 A; e 30 rpm de agitação constante do eletrólito para minimizar a perda de condutividade do meio. Na parte inferior do tubo foi utilizado uma tampa de teflon com intuito de evitar que o eletrólito entrasse no interior do tubo, garantindo assim um tratamento apenas superficial. A figura 14 mostra a configuração deste aparato utilizado para realização do tratamento.

Figura 14: Esquema do aparato utilizado no tratamento PEO dos tubos de alumínio.



Fonte: Autoria própria

Os parâmetros de corrente pulsada unipolar quadrada foram programados na fonte, com largura de pulsos (T_{on}) e tempos de repetição (T_{off}) combinados para três diferentes ciclos de trabalho ($T_{on}/(T_{on}+T_{off})$), os quais estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros dos processos para cada condição de tratamento.

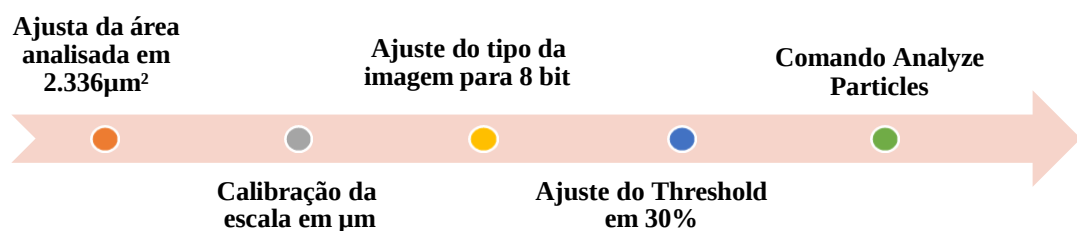
Parâmetros	Condição A2-40	Condição A4-40	Condição B2-50	Condição B4-50	Condição C2-60	Condição C4-60
Ton (μ s)	100	100	150	150	150	150
Toff (μ s)	150	150	150	150	100	100
Ciclo de trabalho (%)	40	40	50	50	60	60
Tempo de tratamento (s)	120	240	120	240	120	240
Frequência (KHz)	4	4	3,3	3,3	4	4

Fonte: Autoria própria

4.3 Caracterização das amostras

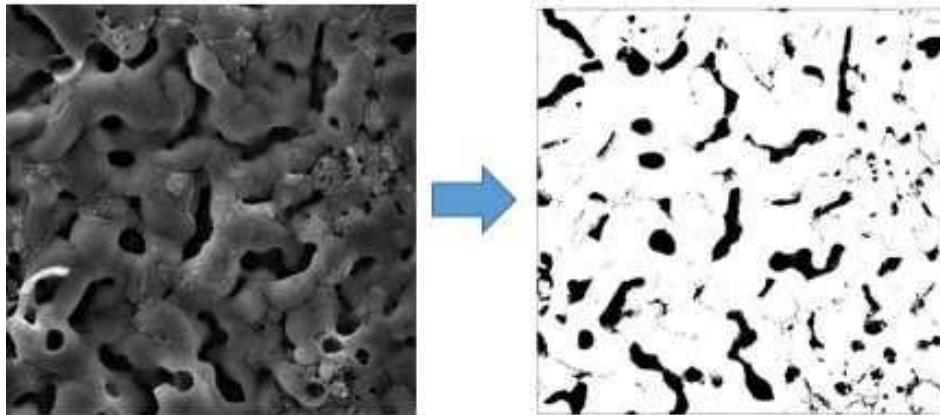
4.3.1 Morfologia

Micrografias da superfície e do perfil do revestimento foram obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de alta resolução Tescan Vega 3, Shimadzu. Para caracterização da porosidade das amostras foi utilizado um software de processamento de imagens de código aberto chamado de ImageJ, onde uma área total de $2.336 \mu\text{m}^2$ de cada micrografia com um aumento de $5000 \mu\text{m}$ foi utilizada para análise. Com a linguagem matemática do programa, foi possível quantificar o número de poros, a porosidade, diâmetro médio e área média dos poros das amostras. A figura 15 demonstra as etapas realizadas para o processamento com ImageJ neste trabalho. A figura 16 o efeito do recurso *Threshold* na imagem.

Figura 15: Etapas realizadas para processamento com ImageJ.

Fonte: Autoria própria

Figura 16: Contagem dos poros utilizando o recurso Threshold do software ImageJ.



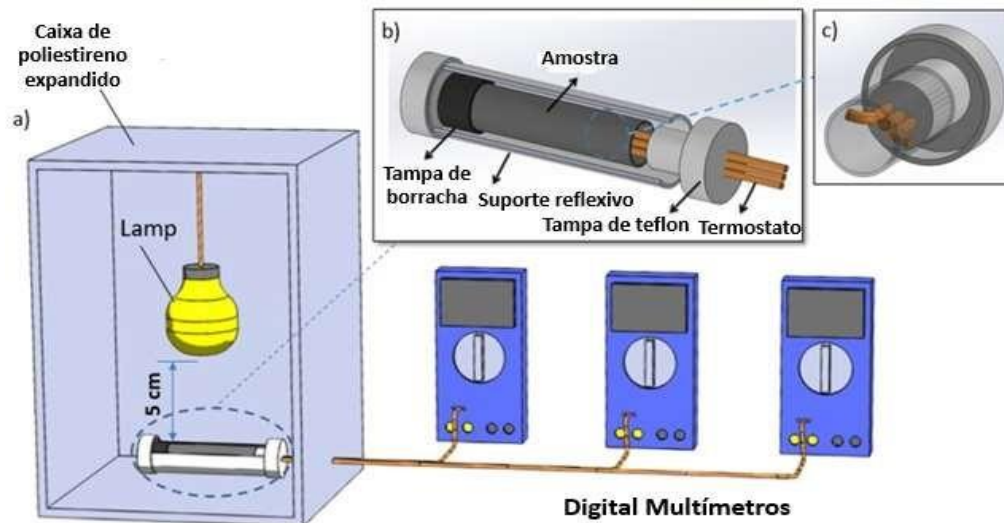
Fonte: Autoria própria

4.4 Propriedades dos revestimentos

4.4.1 Análise térmica

Para avaliar a capacidade de absorção de calor foi utilizado o aparato ilustrado na figura 17. As amostras foram submetidas durante 16 minutos à radiação de uma lâmpada incandescente de 70 W, posicionada a uma altura de 5 cm acima do suporte tipo calha refletora (Fig.17b) confeccionado para fixação dos tubos ensaiados. Dentro das amostras, 5 ml de água destilada com temperatura inicial de 25°C foi utilizado como fluido aquecedor, onde a variação da temperatura durante o aquecimento do mesmo foi medida com auxílio de três termopares tipo K: dois em contato com as paredes do tubo e outro posicionado no centro (Fig.17c), conectados respectivamente a três multímetros, onde cada amostra foi analisada em triplicada para obtenção de uma temperatura média por minuto, cujos resultados foram registrados para construção de uma curva de aquecimento em função do tempo. Para minimizar as perdas de calor, o sistema foi montado dentro de uma caixa tampada de poliestireno expandido, com dimensões internas 190 x 240 x 310 mm (Fig.17a). O teste foi executado para as 6 amostras tratadas, e comparada com os resultados da amostra de AL-6060 sem tratamento com objetivo de avaliar a eficiência na absorção da radiação proveniente da luz. Em seguida, esse mesmo teste foi repetido na amostrada Al-6060 sem tratamento agora pintada com uma tinta preta fosca, com objetivo de avaliar o efeito da superfície enegrecida junto a melhor condição tratada.

Figura 17: a) sistema para o ensaio da absorção térmica; b) suporte refletivo; c) detalhe interno dos termopares em contato com o fluido e paredes do tubo.



Fonte: Autoria própria

A eficiência térmica (E) desse sistema foi calculada pela relação entre o calor cedida pela lâmpada (Q_i) e calor absorvido pelo fluido durante o tempo t (Q_a) pelas equações abaixo (LIMA, 2020):

$$E = \frac{Q_a}{Q_i} \times 100 \% \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{P}{4\pi r^2} \cdot A \cdot t \quad \{J\} \quad (2)$$

$$Q_a = m \cdot c \cdot \Delta t \quad \{J\} \quad (3)$$

Onde: P (Potência da lâmpada incandescente) = 70 W;

r (Distância da lâmpada até a superfície da amostra) = 0,05 m;

A (Área superficial da amostra) = 0,002 m²;

t (Tempo de exposição) = 960 s;

(Massa do fluido (água destilada)) = 5 g;

c (Calor específico do fluido (água destilada)) = 4,184 J/g.°C;

4.4.2 Reflectância óptica

O efeito da refletividade das amostras foi analisado nas faixas de radiação correspondentes às regiões ultravioleta, visível e infravermelho, usando comprimentos de onda

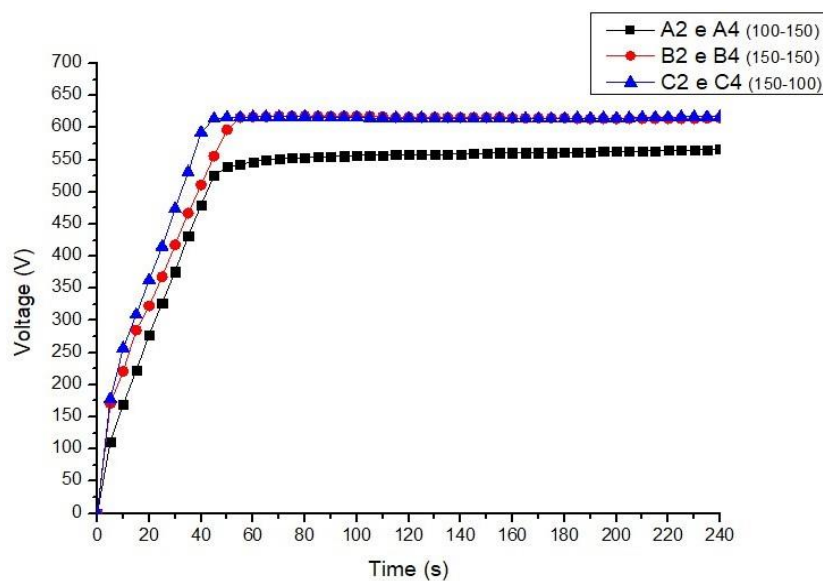
entre 220 nm a 1400 nm. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro UV-Vis-NIR, modelo UV-2600, fabricado pela Shimadzu, com uma esfera integradora para medição da radiação difusa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curva tensão x tempo

Através do acompanhamento dos valores da tensão em função do tempo de tratamento, foi possível lustrar a curva representada na figura 18 que demonstra um comportamento característico aos mencionados na literatura (ANTÔNIO, 2011; DEHNAVI, 2014; DEHNAVI *et al.*, 2013; MONFORT *et al.*, 2007; TAVARES *et al.*, 2019; YEROKHIN *et al.*, 1999).

Figura 18: Curva tensão x tempo para todas as condições.



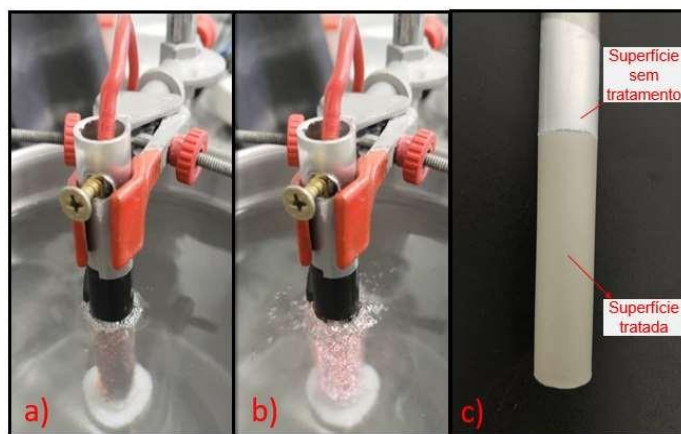
Fonte: Autoria própria

Observa-se no gráfico dois momentos distintos que ocorrem durante o tratamento. No primeiro estágio, conforme a lei Ohm, ocorre um aumento da tensão de maneira linear em um curto período de tempo (entre 40 e 50 s) até o ponto designado na literatura como centelha ou tensão de ruptura da camada dielétrica. À medida que a tensão aumenta, o campo elétrico ao redor da amostra provoca a ruptura da rigidez dielétrica do filme óxido que foi formado principalmente pelas reações de oxirredução e pela difusão dos elementos químicos presentes

no eletrólito, dando início ao aparecimento das centelhas. Primeiramente os micro-arcos apresentaram aspecto alaranjados e com passar do tempo tornaram-se brancos, movendo-se rapidamente e com distribuição uniforme sobre toda superfície. Percebe-se que pulsos mais largos resultou em curvas mais inclinadas, o que influencia diretamente nos tempos de início das primeiras descargas de plasma. Para maiores ciclos de trabalho, 50 e 60%, a tensão de ruptura, bem como a tensão máxima eventualmente alcançada, foram maiores em relação ao ciclo de trabalho de 40%. Resultado semelhante foi obtido por Tavares et al (2019) que utilizou a mesma densidade de corrente (900 A.m^{-2}), e ciclos de trabalho de 30 e 50 % no tratamento PEO em Al comercial puro.

No segundo estágio, após a tensão de ruptura, ocorre uma redução repentina no crescimento da tensão até o momento em que a mesma tende a permanecer constante. As centelhas iniciadas no fim da etapa anterior, se transformam em micro arcos de alta intensidade que desempenham um papel crucial na formação do revestimento, de modo que, nos pontos onde ocorreram as descargas, o substrato reage com a solução eletrolítica, formando uma superfície porosa de óxido de alumínio, o que deixa um aspecto opaco no tubo em relação a seção sem tratamento (Fig. 17c). Para os pulsos de *B* e *C* os valores de tensão são semelhantes e superiores ao pulso *A*. Resultado semelhante encontrado por Lima et al (2020) que justificou esse comportamento devido à espessura do óxido formado ser maior nas condições com maiores ciclos de trabalho. Na figura 19 ilustra o comportamento dos micro-arcos em cada uma destas etapas, assim como o resultado da camada de óxido depositada sobre a superfície.

Figura 19: Ilustração do processo PEO: a) estágio 1 (antes da tensão de ruptura) - anodização convencional e início das centelhas; b) estágio 2 (após a tensão de ruptura) - ação das microdescargas de alta intensidade sobre a superfície da amostra; c) resultado da camada de óxido depositada sobre a superfície da amostra em relação à seção não tratada.



5.2 Energia consumida

A densidade da energia consumida (E) no processo PEO para cada condição de tratamento, foi calculada utilizando da equação (2) descrita no referencial teórico, integrando da curva tensão em função do tempo da Fig. 18. Os resultados da densidade de energia para todas as condições estão representados na tabela 3.

Tabela 3: Densidade de energia consumida (E) no processo PEO.

Condição	A2-40	A4-40	B2-50	B4-50	C2-60	C4-60
Densidade de Energia (KJ.m ⁻²)	54,67	122,1	61,31	135	63,15	137

Fonte: Autoria própria

Os resultados demonstrados na tabela 3 nos diz que a melhor condição energética foi atribuída para amostra A2-40. Percebe-se que a escolha do ciclo de trabalho no processo PEO ocasiona um efeito direto no aumento da energia consumida. Isso porquê, em ciclos maiores, os pulsos ligados (Ton) onde ação das microdescargas está ativa possui um período mais longo, consequentemente maior será energia consumida no processo. Esse efeito é intensificado com o aumento do tempo de tratamento, já que o gasto energético está diretamente ligado a essa variável. Para todas as condições, quando se dobrou o tempo de tratamento, a energia do processo aumentou cerca de 45%.

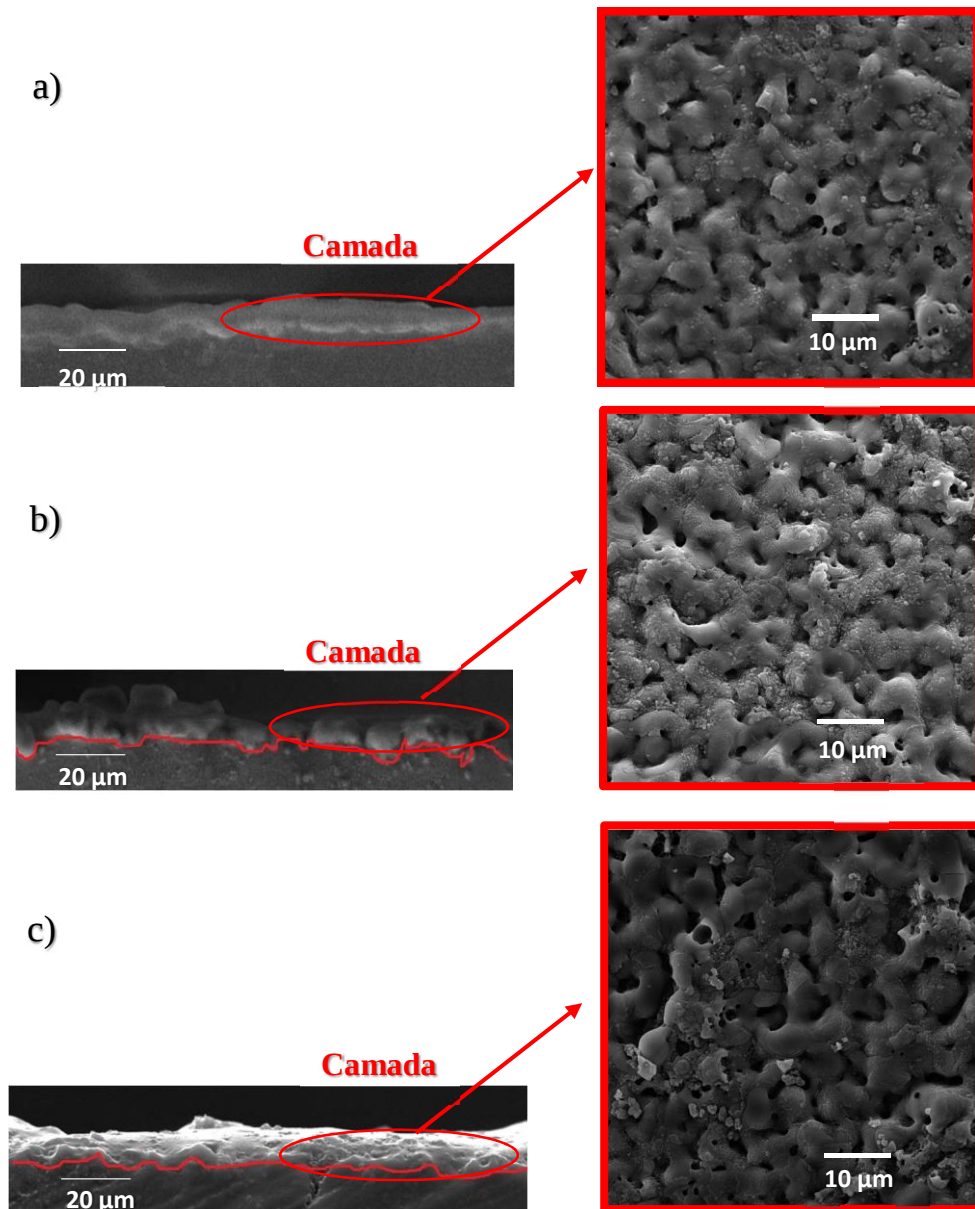
5.3 Caracterização dos revestimentos PEO.

5.3.1 Morfologia

Analizando as micrografias de superfície e das seções transversais das amostras tratadas (figuras 20 e 21), observa-se a formação de uma fina camada irregular e rugosa depositada superficialmente, composta por uma microestrutura de poros e com bordas espessas, principalmente para amostras tratadas com 240 s. Percebe-se a presença de um tipo específicos

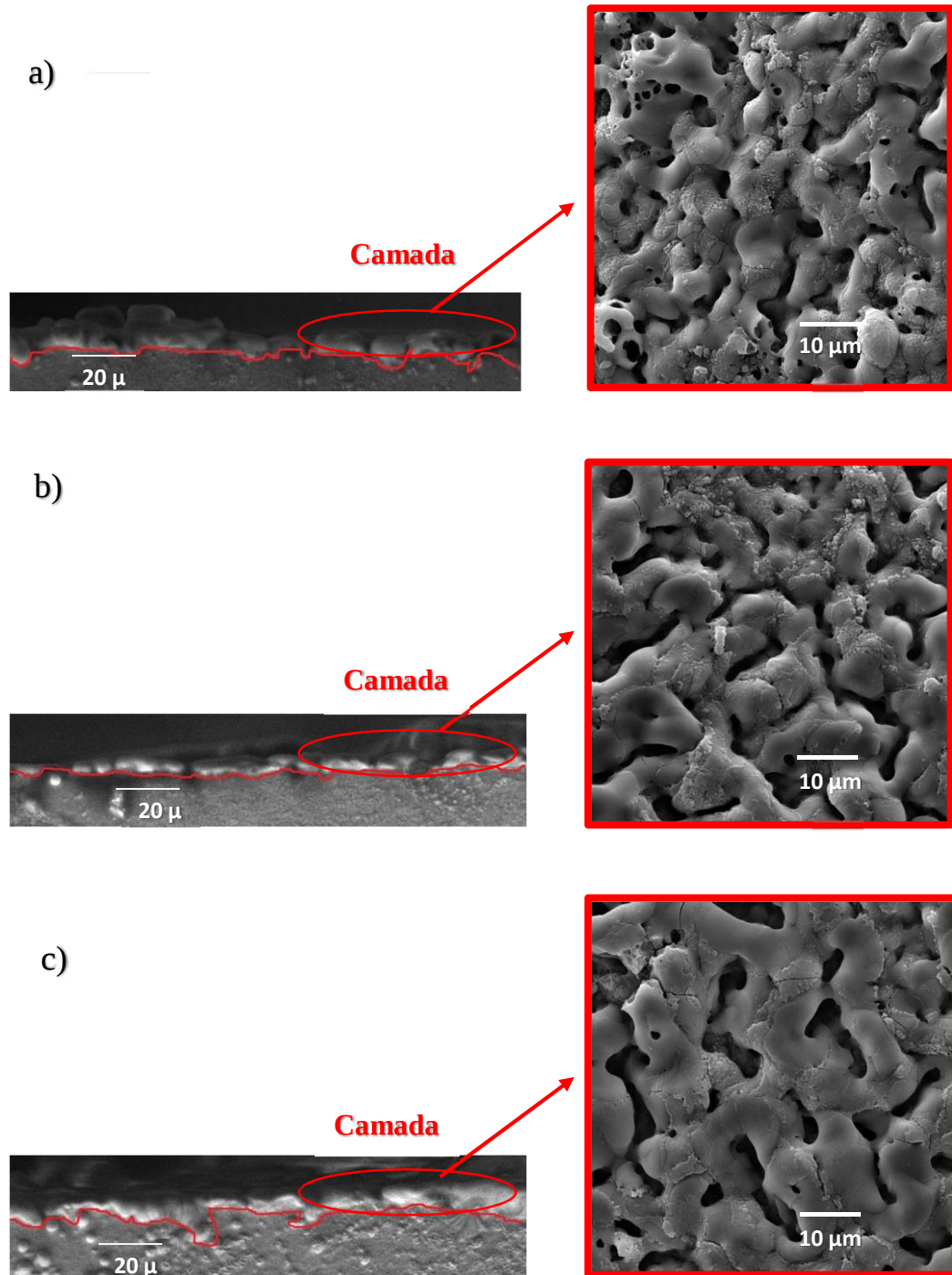
de morfologia denominada na literatura como “erupção vulcânica”, que está associada à intensidade das microdescargas responsáveis pela ejeção do material no fundo da camada de óxido (YANG *et al.*, 2019).

Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura das amostras tratadas por 120 segundos: a) condição A2-40; b) condição B2-50; c) condição C2-60



Fonte: Autoria própria

Figura 21: Microscopia eletrônica de varredura das amostras tratadas por 240 segundos: a) condição A4-40; b) condição B4-50; c) condição C4-60



Fonte: Autoria própria

Comparando a condição menos energética com a mais energética, observa-se que os poros tendem a se coalescerem nestas condições, formando superfícies com maior porosidade.

Essa morfologia é proveniente de descargas de alta potência que podem nuclear rachaduras à medida que se solidificam, e em seguida entram em colapso. Para quantificar essas características macroestruturais, análises de imagens foram realizadas utilizando o ImageJ. Foram calculados número, diâmetro médio e área dos poros, cujos resultados estão demonstrados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados do processamento das amostras utilizando ImageJ.

Amostra	Nº médio de Poros	Diâmetro médio (μm)	Área média (μm^2)	Porosidade média (%)
A2-40	176	0,442	0,80	6,05
A2-40	131	0,613	1,15	9,87
B2-50	153	0,501	1,05	7,20
B4-50	94	0,711	1,86	10,36
C2-60	177	0,493	2,57	7,91
C4-60	79	0,797	3,15	10,60

Fonte: Autoria própria

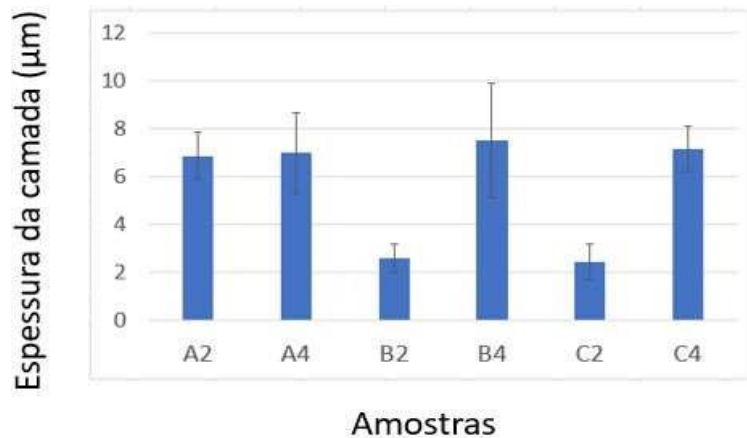
Enquanto a composição microestrutural do filme depositado, podemos supor com base nos estudos já consolidados para processamento PEO em substrato de alumínio, cujo alguns autores foram citados no tópico 3.4.1 da revisão de literatura, que a reação do plasma eletrolítico dos tubos aqui tratados com eletrólito de silicato de sódio, resultou na formação de um revestimento a base de óxido de alumínio ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) e de óxido de silício em fases de baixa intensidades. Pode-se destacar os resultados apresentados por Lima et al (2020) que utilizou os mesmos pulsos das condições A (100,150) e B (150,150), obtendo nos seus resultados uma composição microestrutural formada por estes dois elementos.

Observa-se que as condições com maiores ciclos de trabalho e tempos de tratamento favorecem ao aumento da porosidade no substrato tratado. Essas características são comuns em tratamentos por PEO e podem ser confirmadas nos trabalhos de Martin et al (2013), Dehnavi et al (2013) e Pillai, Rajendra e Sharma (2018). Uma explicação para isso é motivada pela relação direta que o tamanho e as características dos poros possuem com a densidade e intensidade das descargas, ou seja, maiores ciclos de trabalho resultam em descargas de maiores magnitudes. À medida que o tempo de tratamento aumenta, observa-se uma formação de poros

maiores, entretanto em menor quantidade. Para todas as condições, a porosidade foi maior que a média encontrada na literatura para processamento PEO utilizando ciclos de trabalho de baixas frequências (JAFARNIYA KHARANAGH; FAGHIHI SANI; RAFIZADEH, 2014).

Analisando os resultados obtidos das espessuras das camadas medidas com ImageJ (Fig.23), é demonstrado que a espessura do revestimento possui uma relação direta com a duração do tempo de tratamento. De modo que, nas amostras tratadas com 120 s, a camada é mais fina e uniforme, enquanto nas amostras processadas com 240 s, observa-se camadas mais espessas e irregulares. Esse comportamento já era esperado, haja vista que a literatura esclarece que o crescimento do revestimento é resultante do fluxo de alumínio oxidado fundido injetado nos canais de descarga, portanto, com maiores tempos de tratamento, as camadas tendem a ser mais espessas pelo efeito prolongado deste fluxo (DEHNAVI *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2015; YEROKHIN *et al.*, 2005). Em relação ao desvio padrão, as amostras tratadas com 240 s apresentaram um maior desvio, em virtude da maior irregularidade da camada, enquanto nas condições tratadas com 120 s o desvio foi menor, o que mostra um revestimento mais regular.

Figura 22: Espessura da camada obtida pelas amostras tratadas.



Fonte: Autoria própria.

Outro resultado interessante é o fato que, para amostras com maiores ciclos de trabalho (50 e 60%), o efeito da variação da espessura da camada com o tempo de tratamento foi maior. Esse resultado também foi observado por Da Silva *et al.*, (2017), mostrando que: para o processo PEO em altas frequências, quando se deseja controlar a espessura da camada, ciclos de trabalhos mais baixos são mais indicados para se ter uma uniformidade do revestimento em relação ao tempo de tratamento. Dehanavi *et al.*, (2013) explica que essa taxa de crescimento

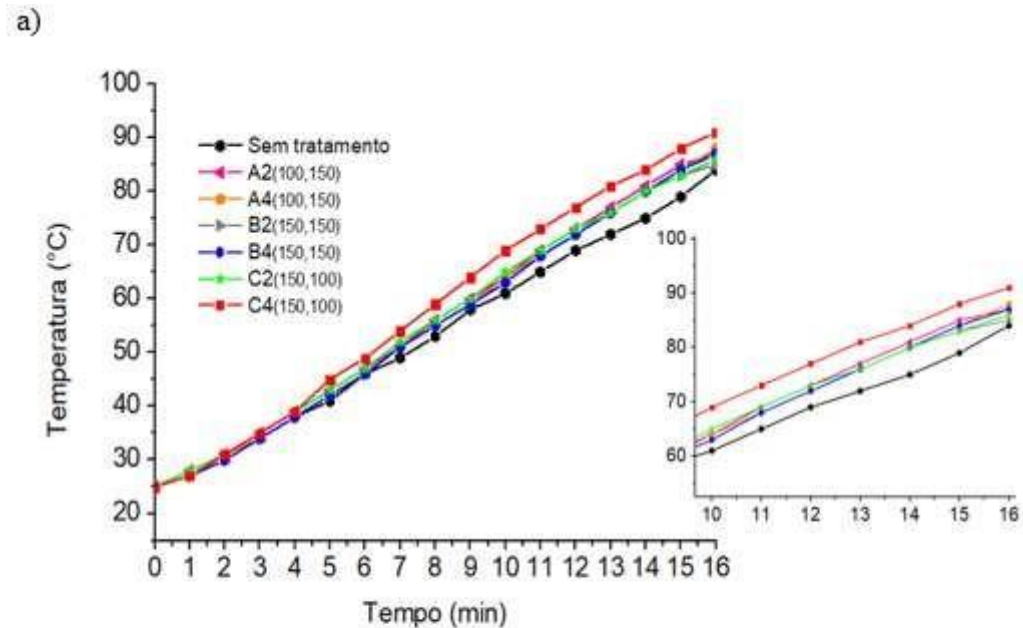
mais uniforme em ciclos de trabalho mais baixos, pode estar associada à quantidade de óxido de alumínio fundido fluindo através dos canais de descargas que se solidificam na presença do eletrólito. Neste caso, como mais descargas estão envolvidas, mais óxido fundido será ejetado. Este resultado é interessante, pois demonstra que o PEO em altas frequências pode ser uma técnica promissora no controle energético do processo, visto que, pode-se obter em tratamentos mais curtos, espessuras de revestimentos equivalentes aos que utilizaram tratamentos mais longos e com ciclos de trabalho superiores. Comparando as condições A2-40 e A4-40, com respectivas espessuras de camada 6,86 e 6,97 μm , e seus respectivos consumos de energia expostos na tabela 2, essa economia seria de 45%. Já comparando A2-40 em relação a condição C4-60 com espessura de 7,16 μm , essa redução energética equivale a 40%.

5.4 Comportamento térmico

A taxa de aquecimento do fluido medida pelo termopar central durante a exposição à luz das amostras tratadas por PEO, é comparada com a do Al-6060 sem tratamento. Este resultado é demonstrado na curva da Figura 24a. Em relação a medição dos termopares em contato com as paredes dos tubos, observou-se que, em todas as condições, os termopares externos mediam temperaturas cerca de 1° a cima do termopar central e os valores eram sempre semelhantes, o que demonstra um fluxo de calor propagado de maneira uniforme sobre a superfície.

A absorção de calor pelo fluido foi maior nas amostras tratadas nas condições A2-40, A4-40, B4-50 e C4-60 (Fig. 24b), tendo a última apresentado uma maior variação de temperatura. Uma das prováveis explicações para esse fato, está na formação de camadas de óxido mais espessas e com altas densidade de poros, onde tais características favoreceram uma maior absorção da radiação. Shen *et al.*, (2012) observou em seus experimentos por PEO em alumínio que uma variação da espessura do revestimento de 10 μm para 100 μm , proporcionou um ligeiro aumento de 1,9 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ para 2,5 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ na condutividade térmica do material.

Figura 23: a) variação da temperatura do fluido durante a exposição à luz medida pelo termopar central; b) temperatura máxima no centro do tubo após 16 min de aquecimento.



b)

AMOSTRA	Sem tratamento	A2	A4	B2	B4	C2	C4
TEMPERATURA (°C)	83	87	88	85	87	86	93

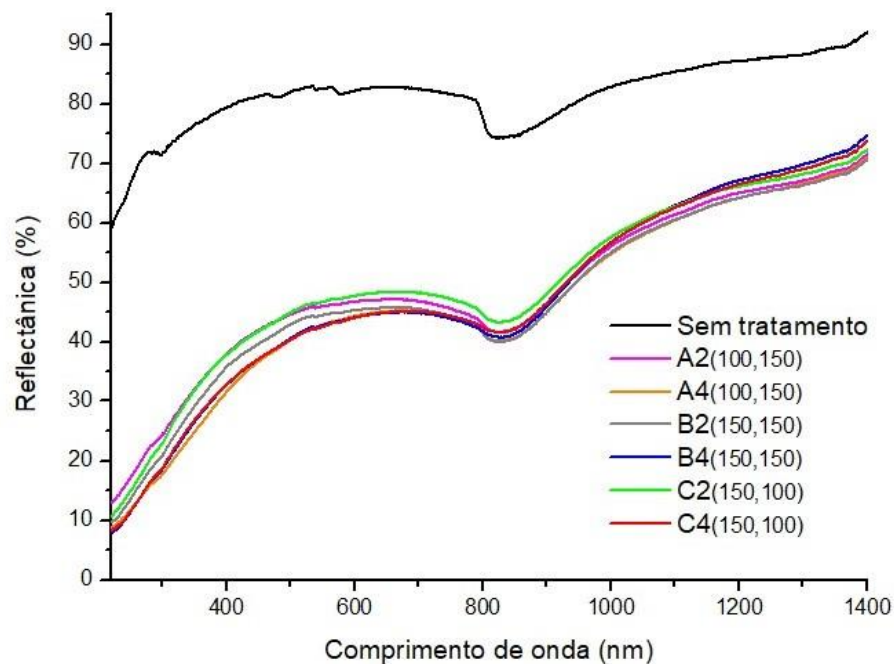
Fonte: Autoria própria

Como visto na revisão bibliográfica no tópico 3.3.1, a presença dos poros na camada depositada aumenta absorção térmica pelo efeito de armadilha óptica, onde parte da radiação incidente sobre a superfície do tubo tratado é absorvida, enquanto o restante é refletido dentro dos poros para posteriormente ser absorvida. Esse processo pode reduzir a reflexão da luz solar da superfície e, portanto, aumentar sua eficiência na absorção térmica das amostras tratadas. Na mesma profundidade de poros (espessura da camada), quanto menor for a abertura (área do poro), mais tempos de reflexão estará presente nos poros, e mais suficiente será a absorção de calor (CHENG *et al.*, 2015). Essa relação profundidade/área do poro, relacionada ao efeito da armadilha óptica, explica o motivo pelo qual a amostra A2-40, a condição de menor gasto energético e menor área média de poros entre as condições ($0,8 \mu\text{m}^2$), obteve níveis de reflexão/absorção semelhantes as outras condições mais energéticas as quais, conforme a literatura, já esperava-se as melhores respostas térmicas. Essa mesma hipótese explica também o porquê da condição C2-60, que gastou 13,43 % a mais de energia, não ter alcançando os níveis

de eficiência térmica superior à amostra A2-40, justamente pela baixa espessura de revestimento formada e a presença de poros cuja área média foi de $2,57 \mu\text{m}^2$. Essa correlação de resultados demonstra que a alta seletividade térmica dos revestimentos porosos obtidos por PEO está ligada à parâmetros que combinem maiores profundidades de revestimentos e/ou apresentem um maior número de poros com menor diâmetro.

Levado em consideração ao comportamento ideal de uma superfície seletiva absorvedora que consiste em absorver toda radiação na faixa de comprimento de onda (λ) que compreende 300 nm até 2000 nm, observa-se através da figura 24 que todas as amostras possuem potencial de serem boas absorvedoras de radiação solar. De maneira geral, as condições tratadas com 120 s tendem a refletir mais e, conseqüentemente, absorvem menos na faixa UV-Vis em relação as tratadas por 240 s. Por um outro lado, pode-se observar que na faixa de comprimento de onda Vis-NIR, houve uma inversão desse resultado.

Figura 24: Espectro de reflectância na região UV-Vis-NIR do Al -6060 sem tratamento e tratado por PEO em diferentes condições.

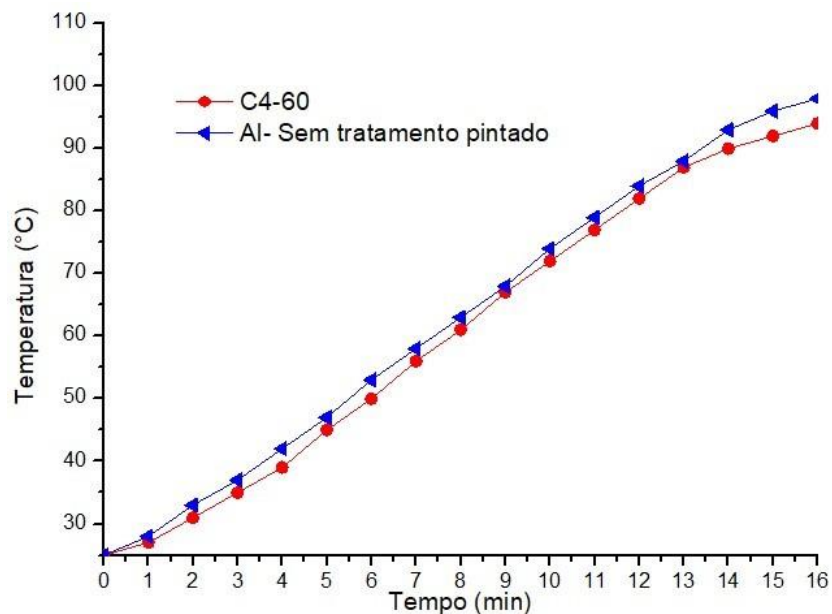


Fonte: Autoria própria

A pintura superficial com tintas enegrecidas sobre as superfícies absorvedoras de radiação é a técnica corriqueiramente utilizada para o aumento da eficiência térmica em um coletor fototérmico. Entretanto, a potencialidade das tintas seletivas serem aplicadas nos

sistemas concentradores da radiação, onde as altas temperaturas do processo exigem revestimentos com boa estabilidade térmica, ainda é um desafio a ser superado (ALVES; CARVALHO; DIAMANTINO, 2020). Por esse motivo, decidimos também avaliar o comportamento de aquecimento do tubo de Al- sem tratamento pintado com uma tinta preta fosca, utilizando a mesma metodologia apresentada no tópico 4.4.1, para comparar seu desempenho em relação a condição C4-60 que obteve a maior eficiência térmica entre as condições oxidadas por PEO. A curva de aquecimento que compara estas duas condições está demonstrada na figura 25.

Figura 25: Curva de aquecimento das amostras C4-60 comparada com Al-Sem tratamento pintada com tinta preta fosca.



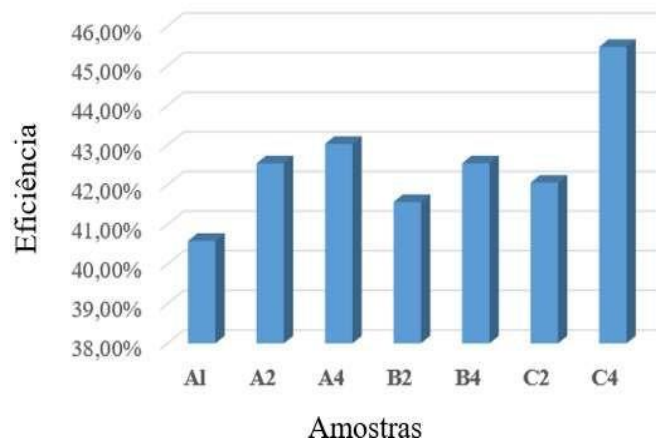
Fonte: Autoria própria

Como era esperado, corpos negros tendem a apresentar uma maior absorção de calor, por esse motivo a temperatura final do tubo Al-6060 pintado alcançou a faixa dos 98°C. Entretanto a condição C4-60 apresentou um desempenho térmico próximo a superfície Al-6060 pintada. Portanto, a utilização do PEO para o desenvolvimento de superfícies seletivas de radiação pode ser vantajosa nas aplicações dos sistemas de concentração de radiação, visto que os revestimentos de óxidos cerâmicos resultantes do PEO em alumínio podem oferecer a estabilidade térmica desejada com eficiências próximas às superfícies enegrecidas com as tintas especiais de radiação, além de proporcionar resistência à corrosão e ao desgaste, que são

características importantes para os coletores fototérmicos (CURRAN et al., 2007; MENGESHA et al., 2020; SIKDAR et al., 2021; TAVARES et al., 2019).

Com relação aos resultados da eficiência térmica das amostras (Figura 26), a maior eficiência foi de 46%, para condição C4-60, cuja diferença da temperatura do fluido aquecido correspondeu à 11 % em relação ao Al sem tratamento. Esse resultado foi próximo ao resultado obtido por Andemeskel, Suriwong e Wamae (2017) que preparam uma tinta seletiva preta através da mistura de duas tintas especiais (Thurmolax 250 e a Dampney 100 Thinner) obtendo eficiências entre 38 a 55% a depender da espessura da camada de tinta aplicada.

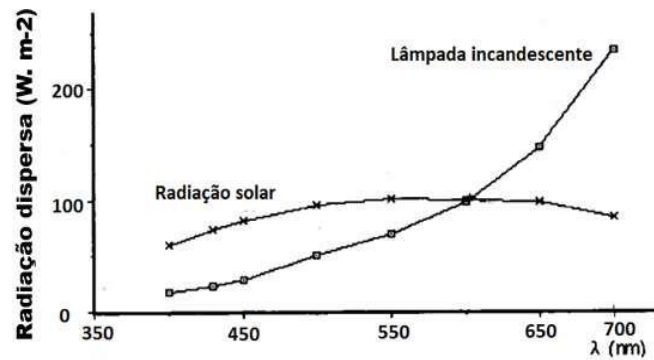
Figura 26: Eficiência térmica do sistema de aquecimento.



Fonte: Autoria própria

Vale salientar que a taxa de aquecimento das figuras 23 e 25 pode demonstrar um comportamento não condizente com os valores reais da absorção solar, visto que, a intensidade da radiação solar é superior à radiação emitida pela lâmpada incandescente utilizada neste experimento. Analisando a figura 27 apresentada por De Lima (1992) que compara o espectro da radiação solar em relação à radiação de uma lâmpada incandescente, numa faixa de comprimento de onda de interesse para aplicação fototérmica, é possível perceber que grande parte da radiação emitida pela lâmpada incandescente corresponde à região do infravermelho, justamente onde as amostras tratadas obtiveram maiores valores de reflectância, conforme observado na Fig. 24.

Figura 27: Espectros da radiação solar direta em relação à radiação de uma lâmpada incandescente.

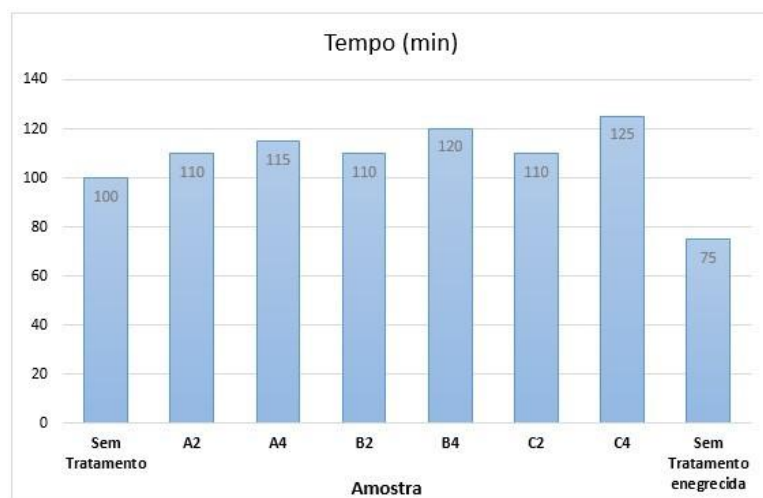


Fonte: Adaptado De Lma (1992)

Portanto, com base nestes argumentos, espera-se que as amostras tratadas possam absorver radiação solar de maneira mais eficiente em relação aos resultados obtido pelas nossas condições experimentais.

Curran et al.(2007) que observou que o revestimentos de PEO produzidos em alumínio, com um eletrólito contendo KOH e silicato de sódio foi capaz de produzir revestimentos com camadas protetoras termicamente isolantes. Por esse motivo, decidimos analisar o efeito deste isolamento nas nossas amostras medindo o tempo necessário para que o fluido aquecido no interior do tubo retornasse à temperatura inicial do experimento (25 °C). Para isso, após os 16 min de aquecimento, a lâmpada era desligada e a partir deste momento iniciava-se a contagem do tempo de resfriamento. A figura 28 apresenta o tempo médio obtido para condição

Figura 28: Tempos de resfriamento das amostras após o aquecimento



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que todas amostras tratadas obtiveram tempo de resfriamento superior às condições sem tratamento pintada e não pintada, mostrando que a espessura da camada depositada por PEO nas nossas amostras, traz o efeito de barreiras térmicas. Curran et al.(2007) atribuiu esse resultado à espessura do revestimento e a baixa condutividade do mesmo. Além disso, podemos atribuir também que o tratamento reduziu a emitância térmica do tubos. Com relação amostra Al-sem tratamento enegrecida, observa-se que essa foi a condição que obteve uma taxa resfriamento maior, mesmo tendo alcançado a maior temperatura de aquecimento. Essa condições está associada à alta emitância que os corpos negros possuem, o que facilita a transferência de calor da amostra com o meio. Esse resultado é interessante para aplicações em coletores solares fototérmicos, visto que, um eficiente coletor necessita também conservar o calor absorvido pelo maior período possível, para que em momentos em que a radiação não é intensa, como em dias nublados ou a noite, o fluido permaneça aquecido por mais tempo. Portanto, essa característica é mais um aspecto relevante para processamento do alumínio por PEO, visando sua aplicação em coletores fototérmicos.

6 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser retiradas deste trabalho:

- (a) Amostras oxidadas em menor energia produziram poros menores, com camadas uniformes. A escolha do ciclo de trabalho no processo PEO ocasionou um efeito direto no aumento da energia consumida. No geral, quanto maior foi o ciclo de trabalho e tempo de tratamento, maior foi o gasto energético. Para todas as condições, quando se dobrou o tempo de tratamento, a energia do processo aumentou cerca de 45%.
- (b) Foi possível observar que o controle dos parâmetros do processo permitiu obter superfícies que tiveram um gasto menor de energia com respostas semelhantes no aumento da absorção térmica na região do visível e uma redução da emitância térmica no comprimento de onda do infravermelho, o que faz destas superfícies promissoras na utilização para coletores solares térmicos.
- (c) O tubo tratado para condição C4-60 apresentou um desempenho térmico próximo à superfície Al- Pintada, com a vantagem de possuir as propriedades expressas na literatura para o processamento PEO do alumínio como aumento da resistência à corrosão e ao desgaste, bem como estabilidade térmica em altas temperaturas operacionais, que são condições importantes para utilização em coletores solares fototérmicos.
- (d) Os filmes depositados foram capazes de aumentar a capacidade de isolamento térmica do substrato tratado, o que é interessante para aplicações em coletores solares fototérmicos, visto que, um eficiente coletor necessita também conservar o calor absorvido, mantendo o fluido aquecido por mais tempo, especialmente nos momentos em que a intensidade da radiação solar é diminuída durante o dia ou no período da noite quando não há incidência solar.
- (e) Foi possível revestir superficialmente tubos de alumínio com uma camada de óxido porosa, cuja morfologia variou com o tempo de tratamento e com o ciclo de trabalho adotados neste estudo. Percebeu-se durante a revisão de literatura que a técnica PEO ainda não foi muito explorada para o processamento de superfícies não planas, portanto, este trabalho pode contribuir com procedimentos metodológicos para trabalhos futuros no processamento superficial de tubos por PEO.

REFERÊNCIAS

- AL-SHAMIRY, F. M. S.; AHMAD, D.; SHARIF, A. R. M.; ARIS, I.; JANUS, R.; KAMARUDDIN, R. Design and development of a photovoltaic power system for tropical greenhouse cooling. **American Journal of Applied Sciences**, v. 4, n. 6, p. 386–389, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3844/AJASSP.2007.386.389>
- ALANNE, K.; SAARI, A. Distributed energy generation and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 6, p. 539–558, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2004.11.004>
- ALVES, I. N.; CARVALHO, M. J.; DIAMANTINO, T. C. Tintas Seletivas Para Aplicação Em Sistemas De Energia Solar Térmica. **XVII Congresso Ibérico y XIII Congresso Iberoamericano de Energía Solar**, p. 1–9, 2020. Disponível em: https://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/3379/1/Cies2020_1_2041.pdf
- ANDEMESKEL, A.; SURIWONG, T.; WAMAE, W. Effects of Aluminum Fin Thickness Coated with a Solar Paint on the Thermal Performance of Evacuated Tube Collector. **Energy Procedia**, v. 138, p. 429–434, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.10.193>
- ANTÔNIO, C. A. **Deposição de filmes por plasma eletrolítico em ligas de alumínio**. 2011. - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2011.
- ARAÚJO, T. do E. S. **INVESTIGAÇÕES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALUMÍNIO TRATADO POR OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA ASSISTIDA POR PLASMA**. 2019. - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Sorocaba, 2019.
- ARAÚJO, T. E. S.; MACIAS MIER, M.; CRUZ OREA, A.; RANGEL, E. C.; CRUZ, N. C. Highly thermally conductive dielectric coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum. **Materials Letters**: X, v. 3, p. 0–3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2019.100016>
- BABAEI, K.; FATTAH-ALHOSSEINI, A.; CHAHARMAHALI, R. **A review on plasma electrolytic oxidation (PEO) of niobium: Mechanism, properties and applications**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100719>
- BANTHUEK, S.; SURIWONG, T.; NUNOCHA, P.; ANDEMESKEL, A. Application of Ni-Al₂O₃ cermet coating on aluminium fin as the solar absorber in evacuated tube collector (ETC). **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 7, p. 14793–14798, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.04.007>
- BARSHILIA, H. C.; KUMAR, P.; RAJAM, K. S.; BISWAS, A. Structure and optical properties of Ag–Al₂O₃ nanocermet solar selective coatings prepared using unbalanced magnetron sputtering. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 95, n. 7, p. 1707–1715, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.01.034>
- BARSHILIA, H. C.; SELVAKUMAR, N.; RAJAM, K. S.; BISWAS, A. Structure and optical properties of pulsed sputter deposited Cr xOy/Cr/Cr₂O₃ solar selective coatings. **Journal of Applied Physics**, v. 103, n. 2, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.2831364>

BILU, N.; MCCULLOCH, D. G.; PARTRIDGE, J. G. Surface & Coatings Technology Aluminium / aluminium oxide nanocomposites prepared using a filtered cathodic vacuum arc. v. 207, p. 529–534, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.066>

CANDANEDO, J. A.; ATHIENITIS, A. K. A systematic approach for energy design of advanced solar houses. **2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2009**, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EPEC.2009.5420363>

CAO, F.; MCENANEY, K.; CHEN, G.; REN, Z. A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers. **Energy and Environmental Science**, v. 7, n. 5, p. 1615–1627, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c3ee43825b>

CERCHIER, P.; PEZZATO, L.; GENNARI, C.; MOSCHIN, E.; MORO, I.; DABALÀ, M. PEO coating containing copper: A promising anticorrosive and antifouling coating for seawater application of AA 7075. **Surface and Coatings Technology**, v. 393, n. April, p. 125774, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125774>

CHENG, Y. liang; CAO, J. hui; MAO, M. ke; PENG, Z. mei; SKELDON, P.; THOMPSON, G. E. High growth rate, wear resistant coatings on an Al–Cu–Li alloy by plasma electrolytic oxidation in concentrated aluminate electrolytes. **Surface and Coatings Technology**, v. 269, n. 1, p. 74–82, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.12.078>

CLYNE, T. W.; TROUGHTON, S. C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. **International Materials Reviews**, v. 64, n. 3, p. 127–162, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>

CURRAN, J. A.; CLYNE, T. W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings. **Acta Materialia**, v. 54, n. 7, p. 1985–1993, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2005.12.029>

CURRAN, J. A.; KALKANCI, H.; MAGUROVA, Y.; CLYNE, T. W. Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 21, p. 8683–8687, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.06.050>

DA SILVA, H. F. M.; TOSCANO, T. D.; GOMES, K. C.; DA SILVA NETO, J. F.; DA COSTA, F. A.; JUNIOR, C. A. Obtaining an optical trap type surface by plasma electrolytic oxidation. **Materials Research**, v. 20, p. 905–909, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0624>. Acesso em: 8 mar. 2021.

DAN, A.; BARSHILIA, H. C.; CHATTOPADHYAY, K.; BASU, B. Solar energy absorption mediated by surface plasma polaritons in spectrally selective dielectric-metal-dielectric coatings : A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, n. May, p. 1050–1077, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.062>

DE LIMA, J. J. Solar radiation--physicochemical aspects. **Acta médica portuguesa**, v. 5, n. 8, p. 437–442, 1992.

DE LIMA, R. N.; DE O. VITORIANO, J.; FERREIRA, M.; ALVES, C. Plasma species and coating compositions in aluminum treated by PEO using shot square pulse. **Materials Research**, v. 23, n. 3, p. 20190444, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0444>. Acesso em: 23 mar. 2021.

DEHNAVI, V. **Surface Modification of Aluminum Alloys by Plasma Electrolytic Oxidation**. 2014. - University of Western Ontario, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/2311>

DEHNAVI, V.; LUAN, B. L.; LIU, X. Y.; SHOESMITH, D. W.; ROHANI, S. Correlation between plasma electrolytic oxidation treatment stages and coating microstructure on aluminum under unipolar pulsed DC mode. **Surface and Coatings Technology**, v. 269, n. 1, p. 91–99, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.11.007>

DEHNAVI, V.; LUAN, B. L.; SHOESMITH, D. W.; LIU, X. Y.; ROHANI, S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.041>. Acesso em: 20 mar. 2021.

DEL COL, D.; PADOVAN, A.; BORTOLATO, M.; DAI PRÈ, M.; ZAMBOLIN, E. Thermal performance of flat plate solar collectors with sheet-and-tube and roll-bond absorbers. **Energy**, v. 58, p. 258–269, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.05.058>

DEL OLMO, R.; MOHEDANO, M.; MINGO, B.; ARRABAL, R.; MATYKINA, E. LDH Post-Treatment of Flash PEO Coatings. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings9060354>. Acesso em: 30 ago. 2022.

DING, Z.; QI, C.; WANG, Y.; TU, J.; WANG, C.; DU, X. Spectrally selective absorption coatings and their applications: A review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102031, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102031>

EGORKIN, V. S.; VYALIY, I. E.; SINEBRYUKHOV, S. L.; GNEDENKOV, S. V.; BOUZNIK, V. M. Effect of polarizing signal duty cycle on the composition, morphology, and protective properties of PEO coatings on AMg3 aluminum alloy. **Inorganic Materials** 2016 52:4, v. 52, n. 4, p. 405–411, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S002016851604004X>. Acesso em: 1 set. 2022.

ELYASI, R.; NOWEE, S. M.; NAMAGHI, H. A.; RAMEZANIAN, N. Preparation and characterization of absorbing tubes with spectrally selective coatings using economical methods for low- to mid-temperature solar thermal collectors. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 141, p. 57–70, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2015.05.021>

FAISAL AHMED, S.; KHALID, M.; VAKA, M.; WALVEKAR, R.; NUMAN, A.; KHALIQ RASHEED, A.; MUJAWAR MUBARAK, N. Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 25, n. May, p. 100981, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100981>

FARZANEH, A.; MOHAMMDI, M.; AHMAD, Z.; AHM, I. Aluminium Alloys in Solar Power – Benefits and Limitations. **Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/54721>

GAO, Y.; YEROKHIN, A.; PARFENOV, E.; MATTHEWS, A. Application of voltage pulse transient analysis during plasma electrolytic oxidation for assessment of characteristics and corrosion behaviour of Ca- and P-containing coatings on magnesium. **Electrochimica Acta**, v. 149, p. 218–230, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.10.063>

GAOUYAT, L.; MIRABELLA, F.; DEPARIS, O. Applied Surface Science Critical tuning of magnetron sputtering process parameters for optimized solar selective absorption of NiCrO x cermet coatings on aluminium substrate. **Applied Surface Science**, v. 271, p. 113–117, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.136>

GĘBAROWSKI, W.; PIETRZYK, S. Growth characteristics of the oxide layer on aluminium in the process of plasma electrolytic oxidation. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 59, n. 1, p. 407–411, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/AMM-2014-0070>

GRANQVIST, C. G. Preparation of thin films and nanostructured coatings for clean tech applications: A primer. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 99, p. 166–175, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.11.048>

GRESS, T.; MITTLER, T.; CHEN, H.; STAHL, J.; SCHMID, S.; BEN KHALIFA, N.; VOLK, W. Production of aluminum AA7075/6060 compounds by die casting and hot extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 280, p. 116594, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2020.116594>

GU, W. C.; LV, G. H.; CHEN, H.; CHEN, G. L.; FENG, W. R.; YANG, S. Z. PEO protective coatings on inner surface of tubes. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 15, p. 6619–6622, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.09.056>

HAN, I.; CHOI, J. H.; ZHAO, B. H.; BAIK, H. K.; LEE, I. S. Changes in anodized titanium surface morphology by virtue of different unipolar DC pulse waveform. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 9- 11 SPEC. ISS., p. 5533–5536, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.07.102>

HASSANIEN, R. H. E.; LI, M.; DONG LIN, W. **Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses**. [S. l.]: Pergamon, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>

HE, S.; ZHANG, Y.; YANG, W.; WANG, Z.; ZHAO, X. Investigation on the Solar Absorption Property of the Nanoporous Alumina Sheet for Solar Application. 2019.

HUSSEIN, R. O.; NORTHWOOD, D. O.; NIE, X. Coating growth behavior during the plasma electrolytic oxidation process. **Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films**, v. 28, n. 4, p. 766–773, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1116/1.3429583>

JACK, S.; PARZEFALL, J.; LUTTMANN, T.; JANSSEN, P.; GIOVANNETTI, F. Flat plate aluminum heat pipe collector with inherently limited stagnation temperature. **Energy Procedia**, v. 48, n. 0, p. 105–113, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.013>

JAFARNIYA KHARANAGH, V.; FAGHIHI SANI, M. A.; RAFIZADEH, E. Effect of current frequency on coating properties formed on aluminised steel by plasma electrolytic oxidation. **Surface Engineering**, v. 30, n. 3, p. 224–228, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1743294413Y.0000000190>

JAISANKAR, S.; ANANTH, J.; THULASI, S.; JAYASUTHAKAR, S. T.; SHEEBA, K. N. A comprehensive review on solar water heaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3045–3050, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.03.009>

JAMAR, A.; MAJID, Z. A. A.; AZMI, W. H.; NORHAFANA, M.; RAZAK, A. A. A review of water heating system for solar energy applications. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 178–187, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028>

JIANG, B. L.; WANG, Y. M. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys. **Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys**, p. 110–154, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781845699451.2.110>

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2004.02.001>

KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1092–1105, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>

KASEEM, M.; FATIMAH, S.; NASHRAH, N.; KO, Y. G. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. **Progress in Materials Science**, v. 117, n. June, p. 100735, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735>

KENNEDY, C. Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials. **NREL Technical Report**, n. July, p. 1–58, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/15000706>. Acesso em: 26 jun. 2022.

KHAN, R. H. U.; YEROKHIN, A.; LI, X.; DONG, H.; MATTHEWS, A. Surface characterisation of DC plasma electrolytic oxidation treated 6082 aluminium alloy: Effect of current density and electrolyte concentration. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, n. 6, p. 1679–1688, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2010.04.052>. Acesso em: 31 ago. 2022.

KLESZCZ, K.; HEBDA, M.; KYZIOŁ, A.; KRAWIEC, H.; KYZIOŁ, K. Towards prevention of biofilm formation: Ti6Al7Nb modified with nanocomposite layers of chitosan and Ag/Au nanoparticles. **Applied Surface Science**, v. 557, p. 149795, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2021.149795>

KOTILAINEN, M.; MIZOHATA, K.; HONKANEN, M.; HYVÄRINEN, L.; VUORISTO, P. Temperature-induced ageing of solar absorbers on plain and anodized aluminium substrates. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 134, p. 244–251, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2014.12.006>

LIMA, R. N. de. **Efeito da Largura de pulso de corrente na oxidação por plasma eletrolítico em alumínio comercial puro**. 2020. - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2020.

LINGAYAT, A.; BALIJEPALLI, R.; CHANDRAMOHAN, V. P. Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review. **Solar Energy**, v. 229, p. 52–68, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.05.058>

LIU, C.; HE, D.; YAN, Q.; HUANG, Z.; LIU, P.; LI, D.; JIANG, G.; MA, H.; NASH, P.; SHEN, D. An investigation of the coating/substrate interface of plasma electrolytic oxidation coated aluminum. **Surface and Coatings Technology**, v. 280, p. 86–91, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.050>

LIU, W.; BLAWERT, C.; ZHELYUDKEVICH, M. L.; LIN, Y.; TALHA, M.; SHI, Y.; CHEN, L. Effects of graphene nanosheets on the ceramic coatings formed on Ti6Al4V alloy drill pipe by plasma electrolytic oxidation. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 789, p. 996–1007, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.03.060>

MARTIN, J.; MELHEM, A.; SHCHEDRINA, I.; DUCHANOY, T.; NOMINÉ, A.; HENRION, G.; CZERWIEC, T.; BELMONTE, T. Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium. **Surface and Coatings Technology**, v. 221, p. 70–76, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.029>

MATYKINA, E.; ARRABAL, R.; MOHEDANO, M.; MINGO, B.; GONZALEZ, J.; PARDO, A.; MERINO, M. C. Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 27, n. 7, p. 1439–1454, 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60166-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60166-3)

MCKENZIE, D. R. Production of solar absorbing cermet films by dual cathode d.c. magnetron sputtering. **Thin Solid Films**, v. 62, n. 3, p. 317–325, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(79\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(79)90006-3)

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. A review on solar energy use in industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1777–1790, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.12.018>

MENGESHA, G. A.; CHU, J. P.; LOU, B. S.; LEE, J. W. Effects of processing parameters on the corrosion performance of plasma electrolytic oxidation grown oxide on commercially pure aluminum. **Metals**, v. 10, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met10030394>

MERCS, D.; DIDELOT, A.; CAPON, F.; PIERSON, J. F.; HAFNER, B.; PAZIDIS, A.; FÖSTE, S.; REINEKE-KOCH, R. Innovative Smart Selective Coating to Avoid Overheating in Highly Efficient Thermal Solar Collectors. **Energy Procedia**, v. 91, p. 84–93, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.06.177>

MOHAMMED, A. K.; HAMAKHAN, I. A. Analysis of energy savings for residential electrical and solar water heating systems. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 27, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101347>

MOHEDANO, M.; MINGO, B.; MATYKINA, E.; ARRABAL, R. Effects of pre-anodizing and phosphates on energy consumption and corrosion performance of PEO coatings on AA6082. **Surface & Coatings Technology**, v. 409, n. December 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126892>

MOK, S. C. Aluminium Economy for Sustainable Development: Aluminium as core material for energy storage and energy saving products: Low cost, high performance, and easy processing in developing countries. **Conference 2011 IEEE Global Humanitarian Technology Conference Aluminium**, p. 41–44, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/GHTC.2011.11>

NOMINÉ, A.; NOMINÉ, A. V.; BRAITHWAITE, N. S. J.; BELMONTE, T.; HENRION, G. High-Frequency-Induced Cathodic Breakdown during Plasma Electrolytic Oxidation. **Physical Review Applied**, v. 8, n. 3, p. 1–5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.031001>

NOMINÉ, A.; TROUGHTON, S. C.; NOMINÉ, A. V.; HENRION, G.; CLYNE, T. W. High speed video evidence for localised discharge cascades during plasma electrolytic oxidation. **Surface and Coatings Technology**, v. 269, n. 1, p. 125–130, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.043>

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1513–1524, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.037>

PEREIRA, C. D. **INFLUÊNCIA DA REFLETÂNCIA E DA EMITÂNCIA DE SUPERFÍCIES EXTERNAS NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**. 2014. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2014.

PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S.; GHISI, E. **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas (v . 1)**. v. 1 ed. Florianópolis- SC: [s. n.], 2015.

PEREIRA, G. F. **SUPERFÍCIES SELETIVAS ABSORVEDORAS COM BASE EM CrO₃: AVALIAÇÃO DOS TRATAMENTOS DOS SUBSTRATOS E INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS FILMES**. 2019. - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, [s. l.], 2019. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63740309>

PETKOVIĆ, M.; STOJADINOVIĆ, S.; VASILIC, R.; ZEKOVIC, L. Characterization of oxide coatings formed on tantalum by plasma electrolytic oxidation in 12-tungstosilicic acid. **Applied Surface Science**, v. 257, n. 24, p. 10590–10594, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.055>

PILLAI, A. M.; RAJENDRA, A.; SHARMA, A. K. Influence of process parameters on growth behaviour and properties of coatings obtained by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AA 6061. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 48, n. 5, p. 543–557, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10800-018-1186-2>

RASSAMAKIN, B.; KHAIRNASOV, S.; ZARIPOV, V.; RASSAMAKIN, A.; ALFOROVA, O. Aluminum heat pipes applied in solar collectors. **Solar Energy**, v. 94, p. 145–154, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.04.031>

RODRÍGUEZ GÓMEZ, J.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; DA SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, p. 3312, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>. Acesso em: 23 ago. 2022.

SEN GUPTA, S. K. Contact glow discharge electrolysis: Its origin, plasma diagnostics and non-faradaic chemical effects. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 24, n. 6, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/6/063001>

SHARMA, A. K.; SHARMA, C.; MULLICK, S. C.; KANDPAL, T. C. Solar industrial process heating: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. December 2016, p. 124–137, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.079>

SHEIKH, N. M. Efficient utilization of solar energy for domestic applications. **2nd International Conference on Electrical Engineering, ICEE**, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICEE.2008.4553911>

SHEN, X.; NIE, X.; HU, H.; TJONG, J. Effects of coating thickness on thermal conductivities of alumina coatings and alumina/aluminum hybrid materials prepared using plasma electrolytic oxidation. **Surface and Coatings Technology**, v. 207, p. 96–101, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.009>

SHOEIBI, S.; KARGARSHARIFABAD, H.; SADI, M.; ARABKOOHSAR, A.; MIRJALILY, S. A. A review on using thermoelectric cooling, heating, and electricity generators in solar energy applications. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102105, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102105>

SIKDAR, S.; MENEZES, P. V.; MACCIONE, R.; JACOB, T.; MENEZES, P. L. Plasma electrolytic oxidation (Peo) process—processing, properties, and applications. **Nanomaterials**, v. 11, n. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano11061375>

SILVA, H. F. M. DA. **OBTENÇÃO DE SUPERFÍCIE SELETIVA DO TIPO ARMADILHA ÓTICA VIA OXIDAÇÃO POR PLASMA ELETROLÍTICO**. 2020. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, [s. l.], 2020.

SIMCHEN, F.; SIEBER, M.; KOPP, A.; LAMPKE, T. Introduction to plasma electrolytic oxidation-an overview of the process and applications. **Coatings**, v. 10, n. 7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>

SOWA, M.; WOSZCZAK, M.; KAZEK-KĘSIK, A.; DERCZ, G.; KOROTIN, D. M.; ZHIDKOV, I. S.; KURMAEV, E. Z.; CHOLAKH, S. O.; BASIAGA, M.; SIMKA, W. Influence of process parameters on plasma electrolytic surface treatment of tantalum for biomedical applications. **Applied Surface Science**, v. 407, p. 52–63, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.170>

SRINIVASAN, G.; RABHA, D. K.; MUTHUKUMAR, P. A review on solar dryers integrated with thermal energy storage units for drying agricultural and food products. **Solar Energy**, v. 229, p. 22–38, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.07.075>

STUDENT, M. M.; IVASENKO, I. B.; POSUVAILO, V. M.; VESELIVS'KA, H. H.; POKHMURS'KYI, A. Y.; SIRAK, Y. Y.; YUS'KIV, V. M. Influence of the Porosity of a Plasma-Electrolytic Coating on the Corrosion Resistance of D16 Alloy. **Materials Science** **2019** **54:6**, v. 54, n. 6, p. 899–906, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S11003-019-00278-Z>. Acesso em: 8 jul. 2022.

TAVARES, M. D. M.; VITORIANO, J. D. O.; SILVA, R. C. L. D.; FRANCO, A. R.; SOUZA, G. B. D.; DA COSTA, J. A. P.; ALVES-JUNIOR, C. Effect of duty cycle and treatment time on electrolytic plasma oxidation of commercially pure Al samples. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 2141–2147, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.020>. Acesso em: 22 mar. 2021.

TAVARES, M. de M. **Oxidação por plasma eletrolítico em superfícies de alumínio comercial puro**. 2018. - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.29333/aje.2019.423a>

TESTAFAMICHAEL, T. **Characterization of Selective Solar Absorbers**. [S. l.: s. n.].

THIYAGU, S.; SYU, H. J.; HSUEH, C. C.; LIU, C. T.; LIN, T. C.; LIN, C. F. Optical trapping enhancement from high density silicon nanohole and nanowire arrays for efficient hybrid organic–inorganic solar cells. **RSC Advances**, v. 5, n. 17, p. 13224–13233, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C4RA13536A>. Acesso em: 25 ago. 2022.

TIAN, Y.; ZHAO, C. Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. **Applied Energy**, v. 104, p. 538–553, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.11.051>

TSAI, D. S.; CHOU, C. C. Influences of growth species and inclusions on the current–voltage behavior of plasma electrolytic oxidation: A review. **Coatings**, v. 11, n. 3, p. 1–21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings11030270>

UMMADISINGU, A.; SONI, M. S. Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5169–5175, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.040>

WANG, X.; ZHU, Z.; LI, Y.; CHEN, H. Characterization of Micro-arc Oxidation Coatings on 6N01 Aluminum Alloy Under Different Electrolyte Temperature Control Modes. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 27, n. 4, p. 1890–1897, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3313-y>

WAZWAZ, A.; SALMI, J.; HALLAK, H.; BES, R. Solar thermal performance of a nickel-pigmented aluminium oxide selective absorber. **Renewable Energy**, v. 27, n. 2, p. 277–292, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00192-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00192-6)

WU, Y.; WANG, C.; SUN, Y.; XUE, Y.; NING, Y.; WANG, W.; ZHAO, S.; TOMASELLA, E.; BOUSQUET, A. Optical simulation and experimental optimization of Al/NbMoN/NbMoON/SiO₂ solar selective absorbing coatings. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 134, p. 373–380, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2014.12.005>

XU, J.; AKHTAR, M.; HARIS, M.; MUHAMMAD, S.; ABBAN, O. J.; TAGHIZADEH-HESARY, F. Energy crisis, firm profitability, and productivity: An emerging economy perspective. **Energy Strategy Reviews**, v. 41, p. 100849, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2022.100849>

YANG, K.; ZENG, J.; HUANG, H.; CHEN, J.; CAO, B. A novel self-adaptive control method for plasma electrolytic oxidation processing of aluminum alloys. **Materials**, v. 12, n. 7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12172744>

YEROKHIN, A. L.; LYUBIMOV, V. V.; ASHITKOV, R. V. Phase formation in ceramic coatings during plasma electrolytic oxidation of aluminium alloys. **Ceramics International**, v. 24, n. 1, p. 1–6, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(96)00067-3)

YEROKHIN, A. L.; NIE, X.; LEYLAND, A.; MATTHEWS, A.; DOWEY, S. J. Plasma electrolysis for surface engineering. **Surface and Coatings Technology**, v. 122, n. 2–3, p. 73–93, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7)

YEROKHIN, A. L.; SHATROV, A.; SAMSONOV, V.; SHASHKOV, P.; PILKINGTON, A.; LEYLAND, A.; MATTHEWS, A. Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process. **Surface and Coatings Technology**, v. 199, n. 2- 3 SPEC. ISS., p. 150–157, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.147>

YEROKHIN, H. M. A. Effects of Treatment Time on Formation of PEO Coatings on Regular Shape Aluminium Foil Substrates. **Libya Journal Applied for science and techonology**, v. 5, n. 1, p. 7, 2018.

ZHANG, X. M.; TIAN, X. B.; YANG, S. Q.; GONG, C. Z.; FU, R. K. Y.; CHU, P. K. Low energy-consumption plasma electrolytic oxidation based on grid cathode. **Review of Scientific Instruments**, v. 81, n. 10, p. 1–5, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.3500319>