

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 25/02/2020.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais  
(POSMAT)

Tamires do Espírito Santo Araújo

**INVESTIGAÇÕES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALUMÍNIO  
TRATADO POR OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA ASSISTIDA POR  
PLASMA**

SOROCABA  
2019

Tamires do Espírito Santo Araujo

**INVESTIGAÇÕES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALUMÍNIO  
TRATADO POR OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA ASSISTIDA POR  
PLASMA**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção de título de Mestre da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração Ciência e Engenharia de Interfaces, sob a orientação do Prof. Dr. Nilson Cristino da Cruz

SOROCABA  
2019

Araujo, Tamires do Espirito Santo.

Deposição de Revestimento Bioativo em Titânio por  
Oxidação Eletrolítica com Plasma / Tamires do Espirito Santo  
Araujo, 2019

65f.: il.

Orientador: Nilson Cristino da Cruz

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Ciências, Bauru, 2019.

1.Oxidação Eletrolítica Assistida por Plasma (PEO). 2.  
Alumínio. 3. Espectroscopia Fotoacústica. I. Universidade  
Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE TAMIREZ DO ESPIRITO SANTO ARAUJO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 25 dias do mês de fevereiro do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Auditório da Biblioteca - ICT - UNESP/Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. NILSON CRISTINO DA CRUZ - Orientador(a) do(a) Curso de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/ UNESP/ Sorocaba, Prof. Dr. ALFREDO CRUZ OREA do(a) Departamento de Física / Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Del Instituto, Prof. Dr. DIEGO RAFAEL NESPEQUE CORRÊA do(a) Instituto Federal de São Paulo - Campus de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de TAMIREZ DO ESPIRITO SANTO ARAUJO, intitulada **Investigações das propriedades térmicas de alumínio tratado por oxidação eletrolítica assistida por plasma.** Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA \_\_\_\_\_. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. NILSON CRISTINO DA CRUZ

  
Prof. Dr. ALFREDO CRUZ OREA

  
Prof. Dr. DIEGO RAFAEL NESPEQUE CORRÊA

***Ao meu melhor amigo e marido Edmilson Zeferino  
e ao meu eterno mestre, Dr. César Augusto Antônio,  
dedico este trabalho.***

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, pela graça de vivenciar o momento.

Aos meus pais e sogros pelo apoio incondicional.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Nilson C. Cruz. À Profa. Elidiane Cipriano Rangel, pelo conhecimento compartilhado não somente de ciência, mas também de vida.

Aos professores Steven F. Durrant e José R. R. Bortoleto, pelo conhecimento compartilhado.

Aos colegas: Larissa Solano, pelo incentivo constante para escrever, análises de MEVe outras análises de desgaste que não entraram na versão final do trabalho; Rafael Parra, pelo companheirismo e conhecimento solidário; Ricardo Blanco, pela troca de experiências; Milena Manosso, pela generosidade em compartilhar experiências; Luan Augusto pelas análises de DRX; Raul Ramos e Lucas Oliveira; pela ajuda na análise e interpretação dos resultados de UV-Vis; Felipe (Casado) pelas risadas; Thais Matiello pela amizade e generosidade com suas ferramentas e ajuda com análises de DRX; Lívia Sottovia, pelo companheirismo e generosidade; Jamille Altheman, pelas primeiras análises de MEV.

Ao Prof. Dr. Alfredo Cruz Orea e Marcos Macías Mier, assim como ao Departamento de Física do Centro de Investigação e de Estudos Avançados do Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) do México, meus mais sinceros agradecimentos pelas análises de Espectroscopia Fotoacústica.

Ao prof. Bruno Gianelli, pelas análises iniciais de espessura do revestimento.

À profa. Ana Paula de Oliveira Pecht, pelas correções e auxílio durante o curso.

Aos professores Dra. Maria Lúcia Pereira Antunes e Dr. Diego Rafael Nespeque Correa, pela correção e apontamentos para a melhoria do trabalho durante o exame de qualificação.

Ao Laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) da UNESP Sorocaba.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

“Tudo aquilo que o homem ignora,  
não existe para ele. Por isso o universo  
de cada um se resume no tamanho do  
seu saber”.

Albert Einstein



## RESUMO

O alumínio é um dos materiais mais utilizados em vários setores da indústria. Devido ao baixo custo, se comparado ao cobre, e considerando sua abundância de oferta, o interesse nas propriedades térmicas do alumínio tem aumentado. Neste contexto, a proposta desta pesquisa é avaliar as propriedades térmicas de amostras de alumínio tratadas por oxidação eletrolítica plasmática (PEO), em eletrólitos de silicato de sódio, utilizando espectroscopia fotoacústica. A rugosidade, morfologia e a composição química dos revestimentos foram analisados, respectivamente, por perfilometria, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). A porosidade da camada superficial do revestimento foi estimada pelo software de processamento de imagem digital, utilizando imagens da análise de MEV, enquanto difração de Raios X (DRX) foi utilizada para determinar a estrutura cristalina das superfícies tratadas. Os resultados das análises demonstraram que os revestimentos, predominantemente constituídos por  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, são rugosos, com superfícies porosas e apresentam boa resistência mecânica. A espectroscopia de absorção de UV-VIS demonstrou que a amostra tratada absorveu em média 18% mais radiação na região infravermelha quando comparada com amostras sem tratamento. Em consequência, como revelado pela espectroscopia fotoacústica a difusividade térmica das amostras tratadas é pelo menos 30% maior se comparada ao alumínio não tratado e 700% maior do que a alumina convencional.

Palavras Chave: Oxidação Eletrolítica por Plasma. Propriedades Térmicas de Alumínio. Espectroscopia Fotoacústica.

## ABSTRACT

Aluminum is one of the most widely used materials in several areas of the industry. Owing to lower cost, if compared to copper, and considering its abundance, the interest on the thermal properties of aluminum has increased. In this context, the proposal of this research is to evaluate the thermal properties of aluminum samples treated by Plasma electrolytic oxidation (PEO), in sodium silicate electrolytes, using photoacoustic spectroscopy. Roughness, morphology and chemical composition of the coatings have been analyzed, respectively, by profilometry, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS). The porosity of the surface layer was estimated by digital image processing using SEM micrographs while X-ray diffraction (XRD) was used for determining the crystalline structure of the treated surfaces. The results of the analyses have shown that the coatings, predominantly constituted by  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, are rough, with porous surfaces and present good mechanical resistance. UV-Vis absorption spectroscopy has shown that the treated sample absorbed on average 18% more radiation in the infrared region than the pristine samples. In consequence, as revealed by photoacoustic spectroscopy the thermal diffusivity of the treated samples is at least 30% larger if compared to untreated aluminum and 700% larger than that of conventional Alumina.

Keywords: Plasma electrolytic oxidation (PEO). Aluminum thermal properties. Photoacoustic Spectroscopy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama esquemático da descarga da zona fundida do revestimento local. ....	21
Figura 2: Representação da célula fotoacústica de dois feixes. Na figura <b>b</b> , <b>s</b> e <b>g</b> representam as posições do suporte, da amostra e do gás, respectivamente.....	25
Figura 3: Esquema da cuba de tratamento.....	28
Figura 4: Processamento de imagem realizado pelo software ImageJ. A imagem corresponde à amostra C. A figura (a) mostra a identificação dos poros automática e a figura (b) mostra a contagem e estimativa da área ocupada. ....	29
Figura 5: Micrografias obtidas por MEV das amostras de alumínio e tratadas por PEO com diferentes condições de tratamento. ....	34
Figura 6: Mapas de EDS da amostra B (acima) e D (abaixo). ....	35
Figura 7: Imagem obtida por MEV da secção transversal da amostra A. ....	38
Figura 8: Porosidade superficial das amostras, em porcentagem, em função da (a) frequência e (b) tempo, obtida por análise de imagem com o software ImageJ. ....	39
Figura 9: Densidade de corrente em função do tempo durante os tratamentos. ....	40
Figura 10: Difratoograma obtido por DRX das amostras tratadas por PEO nas diferentes condições.....	41
Figura 11: Refletância em função do comprimento de onda.....	43
Figura 12: Gráficos da diferença de sinal frontal de posterior conforme equação 11. A linha vermelha corresponde ao ajuste dos dados experimentados...	44
Figura 13: Condutividade térmica das amostras tratadas.....	45
Figura 14: Espessura do revestimento da Série Alfa. Os valores apresentados em azul, são os tempos de tratamento, realizado em cada amostra. ....	54
Figura 15: Espessura do revestimento da Série Beta. Os valores apresentados em azul, são os tempos de tratamento, realizado em cada amostra. ....	56
Figura 16: Foto do experimento pino-sobre-disco. ....	57
Figura 17: Variação de massa após ensaio de pino-sobre-disco. ....	58
Figura 18: Fotos das amostras após ensaio mecânico de pino-sobre-disco. ....	59

Figura 19: Imagens de análise de MEV, após ensaio pino-sobre-disco. O número abaixo da imagem representa a amostra. Todas as amostras são da série Beta, exceto a amostra número 14, que pertence à série Alfa. Todas com ampliação de 200x.....	60
Figura 20: Imagens de análise de MEV, após ensaio pino-sobre-disco. O número abaixo da imagem representa a amostra. Todas as amostras são da série Beta, exceto a amostra número 14, que pertence à série Alfa. Todas com ampliação de 1000x.....	60
Figura 21: Mapa e espectro de EDS, após ensaio de pino-sobre-disco, amostra 3. ....	61
Figura 22: Mapa e espectro de EDS, após ensaio de pino-sobre-disco, amostra 5. ....	61
Figura 23: Mapa e espectro de EDS, após ensaio de pino-sobre-disco, amostra 7. ....	62
Figura 24: Mapa e espectro de EDS, após ensaio de pino-sobre-disco, amostra 8. ....	62
Figura 25: Mapa e espectro de EDS, após ensaio de pino-sobre-disco, amostra 9. ....	63
Figura 26: Mapa e espectro de EDS, após ensaio de pino-sobre-disco, amostra 10. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de condutividade térmica à temperatura ambiente para alguns metais. ....	18
Tabela 2: Propriedades do alumínio. ....	27
Tabela 3: Condições de tratamentos ....	28
Tabela 4: Composição química da liga de alumínio AA1230, por Espectroscopia de Emissão Óptica, em porcentagem. ....	33
Tabela 5: Composição química do revestimento dada em porcentagens, formado após tratamento por PEO, obtido por EDS. ....	36
Tabela 6: Rugosidade da camada formada nas amostras tratadas por PEO. ....	36
Tabela 7: Espessura do revestimento da camada formada após tratamento por PEO.....	37
Tabela 8: Cristalinidade, quantidade de fase e fator de convergência oriundos do Refinamento de Rietveld. ....	42
Tabela 9: Dados experimentais de difusividade térmica, em comparação com dados da literatura.....	45
Tabela 10: Diferentes condições de tratamento - Série Alfa.....	54
Tabela 11: Diferentes condições de tratamento - Série Beta.....	55
Tabela 12: Parâmetros de ensaio de desgaste pino-sobre-disco. ....	57

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	13
2.	Revisão bibliográfica.....	14
2.1.	O alumínio.....	14
2.1.	A transferência de calor .....	15
2.1.1.	Modos de transferência de calor.....	15
2.1.2.	Transferência de calor em materiais metálicos.....	17
2.1.3.	Transferência de calor em materiais cerâmicos .....	18
2.2.	Oxidação Eletrolítica Assistida por Plasma .....	20
2.3.	Estudos realizados sobre a condutividade térmica de alumínio tratado por PEO	22
2.4.	Caracterização Térmica por Espectroscopia Fotoacústica. ....	23
3.	Procedimento experimental .....	27
3.1.	Preparação das amostras .....	27
3.2.	Processo de deposição .....	27
3.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	29
3.4.	Contagem de poros.....	29
3.5.	Medições da rugosidade .....	30
3.6.	Espessura do revestimento .....	30
3.7.	Análise de Variância (ANOVA).....	31
3.8.	Difração de raios X.....	31
3.9.	Espectrofotometria Ultravioleta – Visível – Infravermelho Próximo (UV-Vis-NIR)	31
3.10.	Caracterização térmica .....	32
4.	Resultados e discussões .....	33

4.1.	Caracterização do substrato.....	33
4.2.	Morfologia e topografia.....	33
4.1.	Rugosidade e espessura do revestimento .....	36
4.2.	Porosidade superficial .....	38
4.3.	Densidade de corrente .....	39
4.4.	Análise de composição de fases .....	40
4.5.	Espectrofotometria UV-Vis-Nir .....	42
4.6.	Análise das propriedades térmicas – Espectroscopia Fotoacústica.....	43
5.	Conclusões.....	47
	Sugestões de Trabalhos Futuros .....	48
	Referências bibliográficas .....	49
	Apêndice A: Tratamentos preliminares.....	53

## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio é muito utilizado na indústria por suas interessantes características, tais como: maleabilidade, baixa densidade e elevada resistência à corrosão. Em temperatura ambiente, seu estado é sólido e apresenta cor prateada. Por ser o elemento metálico mais abundante na natureza, este material é largamente empregado nas indústrias alimentícia, farmacêutica, automobilística, aeronáutica, química, petrolífera, entre outras (LEE, *et al.*, 2014; ABAL, 2017).

Ligas de alumínio, por serem consideradas boas condutoras de calor, são tradicionalmente utilizadas na fabricação de painéis. Entretanto essa característica tem aumentado o interesse em outras áreas da indústria, principalmente na sua utilização como dissipadores de calor na indústria eletrônica, tubulações de ar condicionado e aquecedores solares (LEE, *et al.*, 2014).

Alguns estudos relatam alterações da condutividade térmica do alumínio e suas ligas através de revestimentos cerâmicos. Tais revestimentos, além de modificar as propriedades térmicas do alumínio, também podem contribuir para aumento na resistência à corrosão e desgaste, em situações onde o material é exposto a ambientes agressivos (ABUSERWAL, *et al.*, 2017; SLIFKA, 2000).

Uma técnica particularmente interessante neste contexto é aquela que se convencionou chamar de Oxidação Eletrolítica Assistida por Plasma, do inglês *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO), que é uma técnica ambientalmente amigável, economicamente viável e tem sido utilizada para depositar revestimentos cerâmicos sobre metais, tais como alumínio, titânio, nióbio, tântalo, magnésio e suas ligas. Os revestimentos assim produzidos, de maneira geral, apresentam excelente aderência e resistência a corrosão e desgaste (LEE, *et al.*, 2014; WANG, *et al.*, 2016a,b; CURRAN e CLYNE, 2005a,b; CHENG, *et al.*, 2017).

Como a literatura sobre as propriedades térmicas de revestimentos depositados por PEO é escassa (CURRAN e CLYNE, 2005a), este trabalho teve como objetivo estudar a condutividade térmica do alumínio revestido por uma camada de óxido obtida por Oxidação Eletrolítica Assistida por Plasma.

A técnica empregada para verificar tais propriedades térmicas foi a Espectroscopia Fotoacústica. Utilizada para medir propriedades térmicas, óticas e magnéticas em diversos tipos de materiais (ROSENCWAIG e GERSHO, 1976).



## CONCLUSÕES

A análise de espectrofotometria comprovou que amostras tratadas absorvem mais luz ultravioleta, visível e Infravermelho próximo se comparada à amostra não tratada. Isso confirma a teoria de que a energia absorvida foi convertida em calor, corroborando com a análise fototérmica. As análises por espectroscopia fotoacústica, apresentaram aumento na difusividade térmica de pelo menos 31% em relação ao alumínio puro e mais de 700% em relação à Alumina o que consequentemente contribuiu para o aumento da condutividade térmica. A análise se deu pelo emprego da técnica fototérmica não estacionária, que se baseia na absorção de luz por radiação.

O tratamento das amostras com oxidação eletrolítica assistida à plasma, em solução aquosa de silicato de sódio, modificou as propriedades térmica dos materiais.

Como vimos na revisão bibliográfica o setor de aquecimento solar, mesmo sendo utilizado no Brasil, ainda há muito a se desenvolver. Sendo neste setor uma excelente aplicação para o alumínio tratado por oxidação eletrolítica, pois possui um baixo custo de tratamento e retorno energético.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio**, 2017. Disponível em: <<http://abal.org.br/>>. Acesso em: 10 julho 2018.

ABUSERWAL, A. F. et al. The effective thermal conductivity of open cell replicated aluminium metal sponges. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, n. 108, p. 1439-1448, 2017.

ALMOND, D. P.; PATEL, P.; PATEL, P. M. **Photothermal science and techniques**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, v. 10, 1996.

ANSCOMBE, F. J. The validity of comparative experiments. **Journal of the Royal Statistical Society. series A (General)**, v. 111, n. 3, p. 181-211, 1948.

ANTONIO, C. A. **Deposição de Revestimento Bioativo em Titânio por Oxidação Eletrolítica com Plasma**. Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP. Sorocaba. 2018.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7ª ed.: Grupo Gen-LTC, 2012.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7ª ed. ed. [S.l.]: Grupo Gen-LTD, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9ª ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CHENG, Y. et al. The effects of anion deposition and negative pulse on the behaviours of plasma electrolytic oxidation (PEO)—A systematic study of the PEO of a Zirlo alloy in aluminate electrolytes. **Electrochimica Acta**, v. 225, p. 47-68, 2017.

COSTA, R. N. A. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais de um sistema solar de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2007.

CURRAN, A. J.; CLYNE, T. W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings. **Acta Materialia**, v. 54, n. 7, p. 1985-1993, 2006.

CURRAN, J. A. et al. Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 21, p. 8683-8687, 2007.

CURRAN, J. A., E T. W. CLYNE. The thermal conductivity of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium and magnesium. **Surface and Coatings Technology**, v. 199, n. 2, p. 177-183, 2005.

CURRAN, J. A.; CLYNE, T. W. Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium. **Surface and Coatings Technology**, v. 199, n. 2-3, p. 168-176, 2005.

DUDAREVA, Y.; IVASHIN, P. V.; KRUGLOV, A. B. Investigation of the thermophysical properties of the oxide layer formed by microarc oxidation on Al-Si alloy. **MATEC Web of Conferences**, v. 129, n. EDP Sciences, p. 02015, 2017.

GONZÁLEZ, M. M. M. et al. Thermal Characterization of Calcium Phosphates for Biomedical Use. **International Journal of Thermophysics**, v. 31, n. 2, p. 374-377., 2010.

GUPTA, P. T. et al. Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 21, p. 8746-8760, 2007.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferencia de Calor e de Massa**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KASALICA, B. et al. The mechanism of evolution of microdischarges at the beginning of the PEO process on aluminum. **Surface and Coatings Technology**, v. 298, p. 24-32, 2016.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. Tradução da 7ª Edição norte-americana. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

LEE, J. et al. Effect of Sealing on Thermal Conductivity of Aluminium Anodic Oxide Layer. **Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics**, v. 9, n. 1, p. 136-140, 2014.

LUGOVSKOY, A. et al. Production of ceramic layers on aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation in alkaline silicate electrolytes. **Applied Surface Science**, v. 264, p. 743-747, 2013.

MATERIALS., A. S. F. T. A. **ASTM B208-06: Standard specification for aluminum and aluminum-alloy sheet and plate**. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania. 2006.

OGAWA, M. et al. The development of a thermal diffusivity reference material using alumina. **Measurement Science and Technology**, v. 12, p. 2058, 2001. ISSN 12.

OLIVEIRA, L. S. D. Metaestabilidade Estrutural do Sistema Ni-Ti-Ge Induzida por Mechanical Alloying, Manaus, 2017.

OLIVEIRA, P. M. S. D. Determinação das propriedades térmicas e óticas do semicondutor CdTe por espectroscopia fototérmica, Viçosa - MG, 2008.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE. São José dos Campos. 2017. (2ª ed.).

PESSOA JR, O. **Aplicações de medidas de fase do efeito fotoacústico**. UNICAMP. Campinas. 1985.

PESSOA JR., O. et al. Two-beam photoacoustic phase measurement of the thermal diffusivity of solids. **Journal of Applied Physics**, v. 59, n. 4, p. 1316-1318, 1986.

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.

RAJ, V.; MUBARAKALI, M. Formation of ceramic alumina nanocomposite coatings on aluminium for enhanced corrosion resistance. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5341–5352, 2009.

ROSENCWAIG, A.; GERSHO, A. Theory of the photoacoustic effect with solids. **Journal of Applied Physics**, v. 47, n. 1, p. 64-69, 1976.

SARVAN, M. et al. Investigation of long-duration plasma electrolytic oxidation of aluminum by means of optical spectroscopy. **Surface & Coatings Technology**, v. 254, p. 270–276, 2014.

SCHMITT, M. et al. Application of photoacoustic spectroscopy to characterize thermal diffusivity and porosity of caprocks. **Engineering Geology**, 220, 30 março 2017. 183-195.

SHEN, D. J. et al. Microstructure, temperature estimation and thermal shock resistance of PEO ceramic coatings on aluminum. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, n. 1-3, p. 477-481, 2008.

SLIFKA, ANDREW J. Thermal-conductivity apparatus for steady-state, comparative measurement of ceramic coatings. **Journal of research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 105, n. 4, p. 591, 200.

SOLETROL. Soletrol - aquecedores solares de água. **Como Funciona o aquecedor solar Soletrol**, 2018. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/extras/como-funciona-o-aquecedor-solar-soletrol/>>. Acesso em: 12 set. 2018.

TAN, J. C. et al.. A steady-state Bi-substrate technique for measurement of the thermal conductivity of ceramic coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 3, p. 1414-1420, 2006.

TOULOUKIAN, Y S. Thermophysical Properties of Matter-The TPRC Data Series. Volume 10. Thermal Diffusivity. **Thermophysical and Electronic Properties Information Analysis Center Lafayette**, 1974.

WANG, et al. 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. 1-8, 2018.

WANG, P. et al. Effect of zirconia sol on the microstructures and thermal-protective properties of PEO coating on a cast Al–12Si piston alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 657, p. 703-710, 2016.

WANG, P. et al. The formation mechanism of the composited ceramic coating with thermal protection feature on an Al 12Si piston alloy via a modified PEO process. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 682, p. 357-365, 2016.

WANG, R. **High Current Plasma Electrolytic Oxidation Coating Processes for Wear and Corrosion Prevention of Al 2024**. University of Windsor. Ontario - CA. 2018.

YANG, Y.; WU, H. Effects of current frequency on the microstructure and wear resistance of ceramic coatings embedded with SiC nano-particles produced by micro-arc oxidation on AZ91D magnesium alloy. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 26, n. 10, p. 865-871, 2010.

YEROKHIN, A. L. et al. Plasma electrolysis for surface engineering. **Surface and coatings technology**, v. 122, n. 2-3, p. 73-93, 1999.