ENGENHARIA NO SÉCULO XXI

Volume 5

Editora Poisson

Editora Poisson

Engenharia no Século XXI

Volume 5

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2019

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais

Msc. Davilson Eduardo Andrade

Msc. Fabiane dos Santos Toledo

Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC

Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy

Msc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

**Engenharia no Século XXI - Volume 5/
Organização Editora Poisson - Belo
Horizonte - MG: Poisson, 2019**

Formato: PDF

ISBN: 978-85-7042-121-0

DOI: 10.5935/978-85-7042-121-0

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação.I. Título

CDD-620

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

www.poisson.com.br

contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Análise de fratura em elementos utilizados na exploração do GNL submetidos à vazamentos criogênicos	06
--	----

Kaique Moreira Matos Magalhães, Armando Sá Ribeiro Junior, Geraldo Jose Belmonte dos Santos

Capítulo 2: Avaliação da viabilidade da obtenção de filamento para impressora 3D a partir de polietileno reciclado	13
---	----

Letícia Noronha da Silva, Sílvia Inês Mombach, Tatiana Rocha, André Canal Marques

Capítulo 3: Reaproveitamento dos resíduos da construção civil na obtenção de membranas cerâmicas para tratamento de efluentes	18
--	----

Adriano Lima da Silva, Carlos Bruno Barreto Luna, Ewerton de Oliveira Teotônio Bezerra, Patricia da Silva Santos, Alexsandra Cristina Chaves , Gelmires de Araújo Neves

Capítulo 4: A corrosão na indústria cimenteira: problemas com corrosão nos filtros de processo dos fornos de clínquer	33
--	----

Leomar Oliveira dos Santos, Josy Eliziane Torres Ramos

Capítulo 5: Densificação do combustível nuclear $UO_2-Er_2O_3$ fabricado por mistura a seco	38
--	----

Artur Cesar de Freitas, Alberto Ermanno dos Santos Sansone, Michelangelo Durazzo, Elita Fontenele Urano de Carvalho

Capítulo 6: Análise da microestrutura e da dureza da liga de alumínio A.380 sob diferentes teores de estrôncio.....	47
--	----

Bernardo Lohmann Guimarães, Elisson Jobbins de Arruda, Luciano Augusto Lourençato

Capítulo 7: Análise da influência da quantidade de ZrO_2 no tamanho de grãos de Al_2O_3 em compósitos cerâmicos de zircônia em matriz de alumina.....	55
--	----

Isabel Christina Franco Silva, Daniel Alessander Nono, Janaina Pereira Mendes, Renata Lopes Gonçalves de Souza, Maria do Carmo de Andrade Nono

Capítulo 8: Avaliação de desgaste de máscaras aplicadas a ferramentas de forjamento a quente	61
---	----

Mariana Lagnier Azevedo, Lirio Schaeffer, Luana de Lucca de Costa, Rafael Menezes Nunes

Capítulo 9: Aplicação do Método de Taguchi para avaliação dos parâmetros de caracterização microestrutural com reagente Nital em um aço Dual Phase	70
---	----

Antonio dos Reis de Faria Neto, Cristina Sayuri Fukugauchi, Marcelo dos Santos Pereira

SUMÁRIO

Capítulo 10: Professor do curso de engenharia civil: De uma prática pedagógica tradicional à uma ação docente inovadora	85
--	----

Hugo Alexander Martins Pereira

Capítulo 11: Análise das disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear no curso de Engenharia de Produção	93
---	----

Janaina Fernanda Marcolin, André Sandmann, Denise Martinhago, Everton Coimbra de Araújo

Capítulo 12: Projeto pré-cálculo: Reforço matemático para os cursos de engenharia em trilhas de aprendizagem do ensino híbrido	103
---	-----

Ubirajara Carnevale de Moraes, Vera Lucia Antonio Azevedo, Marili Moreira da Silva Vieira, Celina A. A. P. Abar

Capítulo 13: Estudo do óleo de mamona como aditivo em banhos de eletrodeposição de Zn	111
--	-----

João Vitor Rego Muniz, Maria Eliziane Pires de Souza, Jhonatan Peres de Sousa

Capítulo 14: Caracterização morfológica de fibras de ECOVIO®/PNIPAAm obtidas por meio da técnica de eletrofiação	119
---	-----

Priscila Schroeder Curti, Ricardo Luiz de Souza

Capítulo 15: Influência da temperatura de queima nas propriedades de vitrocerâmicas produzidas com pó de vidro reciclado e adição de óxido de nióbio	126
---	-----

Hasmin Rohem Gualberto, Pedro Martins da Rocha, Fernanda Arruda Nogueira da Silva, Edgar Poiate Júnior, Isis Andrea Venturini Pola Poiate, Mônica Calixto de Andrade

Capítulo 16: Estampagem incremental em polímeros PETG e PVC	134
--	-----

Cheng Te Hung, Manolo Lutero Gipiela, Paulo Victor Prestes Marcondes

Capítulo 17: Obtenção e caracterização de um polímero composto com resíduos de MDF	143
---	-----

Jailton Weber Gomes, Luiz Guilherme Meira de Souza, Carlos Roberto Rocha da Silva, Luiz Guilherme Vieira Meira de Souza

Autores	153
----------------------	-----

Capítulo 1

Análise de fratura em elementos utilizados na exploração do GNL submetidos à vazamentos criogênicos

Kaique Moreira Matos Magalhães

Armando Sá Ribeiro Junior

Geraldo Jose Belmonte dos Santos

Resumo: O presente trabalho tem como escopo a análise numérica de uma trinca em um elemento estrutural, utilizado na exploração do GNL, com carregamento de serviço submetido à um vazamento criogênico. Inicialmente determinou-se o estado de tensão da viga devido ao carregamento de serviço e, posteriormente, realizou-se estudos em função da troca de calor entre o fluido criogênico e o material. Com isso determinou-se o perfil de temperatura na região da trinca e o estado de tensão devido à combinação de carga térmica e de serviço. Esta análise investigou a energia de propagação da trinca, quando for submetida a tensões mecânicas e térmicas, estudando, portanto, o seu desenvolvimento em situações que baixam a tenacidade à fratura. As análises mostraram que a temperatura criogênica, gera um gradiente térmico que baixa a resistência à fratura do elemento, fazendo com que a trinca se torne instável, podendo se propagar.

Palavras-chave: Mecânica da Fratura, Propagação de trinca, Vazamento criogênico, Análise numérica.

1 INTRODUÇÃO

A produção de gás natural em poços offshore é atualmente uma atividade de suma importância na economia mundial, mas está muito limitada pelos altos custos de montagem de sistema de tubulações para escoamento do produto em longas distâncias. Uma alternativa para o aproveitamento dessa riqueza é o processo denominado de Gás Natural Liquefeito Embarcado, também conhecido pela sigla FLNG, da expressão inglesa Floating Liquefied Natural Gas, que permite armazenar e transportar uma grande quantidade deste produto através de navios especialmente projetados para este fim. Neste processo, o gás natural é liquefeito (GNL), armazenado em vasos criogênicos dos navios e transportado até a estação de armazenagem em terra, onde retorna à sua condição de gás (regasificação) quando então é distribuído para uso comercial ou industrial.

Cada vez mais pesquisas estão sendo realizadas na área para uma melhor certificação dos processos relativos principalmente à segurança estrutural das plantas FLNG. Paltrinieri, Tugnoli e Cozzani (2015) fizeram um estudo para identificação dos perigos referentes à tecnologia inovadora de regasificação de GNL, desenvolvendo novas metodologias para análise de risco durante o processo. Para cada categoria de equipamento foram identificados vários tipos de problemas, quebra de casco em fase de vapor e líquido, vazamento de gás e ruptura catastrófica além do colapso de vasos.

Esta análise introduz todos os cenários de acidentes atípicos mais importantes identificados para a regaseificação de GNL. Um dos riscos mais impactantes identificado neste estudo é referente aos possíveis danos causados pelo líquido criogênico, por exemplo, durante um vazamento accidental. Este tipo de carga poderá ocasionar a falha de alguns componentes estruturais. Patel et al. (2011) definiu aspectos relativos à segurança operacional e algumas perspectivas regulatórias para plantas FLNG, em função principalmente da crescente procura na comercialização de campos de gás offshore acoplados às previsões da indústria indicando que a demanda mundial de gás natural aumentará, levando a um interesse significativo no desenvolvimento de plantas de produção de gás natural liquefeito.

O efeito da temperatura criogênica nas propriedades do material pode ser observado por Lee et al. (2009), Park et al. (2011), Park et al. (2012) e Ehlers et al. (2012) que buscaram avaliar experimentalmente e numericamente a distribuição do gradiente térmico em estruturas que estão em contato direto com a temperatura criogênica, oriunda do processo de liquefação do gás natural, e o efeito deste gradiente na mudança das propriedades do material.

O entendimento dos efeitos térmicos dos vazamentos criogênicos para avaliação da propagação de trinca pode ser observado no trabalho experimental desenvolvido por Kalan e Petti (2011). Foram determinados neste estudo os campos de tensão que podem ser gerados, por exemplo, na extremidade de uma trinca no elemento estrutural que compreende os cascos de navios-tanque, quando submetidos a tensões térmicas resultantes do contato com o GNL.

Dada a importância dos elementos estruturais ligados à produção, armazenagem e distribuição do GNL, neste estudo será avaliado um modelo numérico para representar o comportamento real de estruturas em serviço, quando estão submetidas à vazamentos criogênicos accidentais. Caso este elemento possua uma trinca, inicialmente estável, o modelo irá simular o seu comportamento após as tensões térmica e de serviço, para verificação da sua estabilidade (se a trinca irá ou não se propagar).

2 MATERIAL E MÉTODO

As análises foram divididas em duas etapas, a primeira é a parte da avaliação preliminar do estado de tensões em que a viga está submetida na região da trinca, somente com os carregamentos de serviço, antes do vazamento criogênico. A segunda etapa são as análises na região da trinca, com o estado de tensões já definido anteriormente, pode-se avaliar a sua estabilidade em carregamentos de serviço após o vazamento do líquido criogênico (devido às tensões térmicas induzidas) e verificar a sua estabilidade.

O programa utilizado para modelagem numérica do problema foi o ABAQUS®/CAE. A simulação representa um ensaio realizado em uma máquina universal (EMIC modelo DL-1000) na temperatura ambiente (24°C) com deslocamento do travessão a uma taxa de 0,05mm/min. O gradiente térmico é simulado no elemento estrutural caso ele entre em contato com o nitrogênio líquido (-192°C). A utilização do nitrogênio é pelo fato dele possuir uma boa representatividade da temperatura criogênica criada pelo vazamento accidental em uma estrutura FLNG. Em um estudo realizado por Magalhães et al. (2018) obteve-se a validação do gradiente térmico experimental devido ao contato do nitrogênio líquido com o aço.

A modelagem computacional segue as dimensões adotadas para a preparação do corpo de prova referente a um perfil W 360 x 72,0 mm (Figura 1).

Figura 1 - Perfil modelado na análise numérica.

No modelo computacional para análise da estabilidade da trinca em um gradiente de temperatura criogênico, é necessário declarar as propriedades que governam o comportamento do material quando este é submetido às condições a serem analisadas. Todas as unidades declaradas no modelo estão de acordo com o Sistema Internacional de Unidade (SI) e são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de entrada da análise térmica.

Propriedade	Símbolo	Valor
Densidade [kg/m ³]	ρ	7850
Condutividade Térmica [W/(mK)]	k	51.9
Capacidade Térmica Específica [J/(kgK)]	c	730
Tempo de análise (s)	t	1000
Temperatura inicial (C°)	T_0	24

A malha na região da trinca precisa ser bem refinada para que o programa apresente resultados confiáveis na determinação da integral J. Embora os elementos selecionados na malha do modelo computacional fossem quadriláteros, o número de elementos na região próxima à trinca foi aumentado para obtenção do refino necessário. Na Figura 2 pode-se observar a malha utilizada no modelo para determinar todas as análises propostas neste trabalho.

Figura 2 – Malha utilizada nas análises.

Oito Sets foram criados para avaliar os dados de saída do programa, estes elementos são criados para visualizar os resultados nos contornos do Integral J sendo fundamental na validação dos resultados, uma vez que esses contornos não podem ter valores diferentes.

A Figura 3 mostra todos os nós criados ao redor da ponta da trinca estudada. Após a análise, esses conjuntos fornecerão os gráficos com os valores da Integral J, que na segunda etapa serão comparados com os limites de tenacidade à fratura do material estudado.

Figura 3 – Sets para o cálculo da Integral J.

Após a definição do gradiente de temperatura obtido pela análise preliminar do problema, o arquivo de saída (.odb) foi salvo para criar outra etapa que avaliará a análise de tensão durante o teste de flexão de 3 pontos. Nesta etapa, apenas o carregamento de serviço foi aplicado para a determinação das tensões nas regiões próximas à trinca. As tensões de tração aplicadas neste primeiro estágio foram 190 MPa no elemento plano que representa a mesa do perfil. A Figura 4 mostra a região da trinca existente no elemento analisado.

Figura 4 – Vista superior do perfil metálico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise realizada no modelo foi a análise térmica, para determinar o perfil de temperatura próximo à região da trinca. Com os dados de condutividade térmica, densidade, calor específico e coeficiente de convecção foi possível determinar em um certo incremento de tempo que a troca de calor entre o fluido e o elemento foi suficiente para que houvesse uma variação da temperatura na região próxima à trinca (Figura 5).

Figura 5 – Gradiente térmico gerado pelo líquido criogênico

Esta análise foi realizada buscando estabelecer o critério de convergência, para que o gradiente de temperatura se estabilizasse. Pode ser visto na Figura 5 que a temperatura na região da trinca permaneceu próxima a $-137,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma variação de $58,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ da temperatura inicial no momento do vazamento.

Sete Steps de carregamento foram realizados variando-se a tensão aplicada. A tensão aplicada em cada etapa foi de $27,14\text{ MPa}$, e na última etapa, o valor final foi de 190 MPa . A Figura 6 mostra o primeiro passo e a Figura 7 o último.

Figura 6 - Primeiro step da análise.

Figura 7 – Último step da análise.

Observa-se que ao longo dos contornos criados para verificar a Integral J houve concentração de tensões que se originaram na ponta da trinca e que podem aumentar causando deformações plásticas, se o limite à tenacidade do material, KIC, for atingido a propagação pode ocorrer.

Para as sete etapas de carregamento do perfil na região onde foram criados os contornos para a determinação da integral J, os valores foram calculados e comparados na Tabela 2, chegando-se à conclusão de que o resultado convergiu para o mesmo valor e, portanto, podem ser considerados valores confiáveis

Tabela 2 – Valores da Integral J.

STEP	J (N/mm)
1	12,082
2	12,092
3	12,083
4	12,086
5	12,112
6	12,116
7	12,140

Comparando estes valores e fazendo uma média aritmética entre eles para a determinação de J integral, chega-se a $J = 12.102 \text{ N/mm}$, esse valor quando comparado ao limite do material ($JIC = 21 \text{ N/mm}$), faz com que a trinca permaneça estável sob estas condições.

Para a determinação numérica da tensão final, foram utilizados os arquivos gerados na análise térmica (que forneceu o gradiente de temperatura) das partições criadas como dados de entrada do modelo e incluída as tensões mecânicas devidas ao carregamento em serviço do elemento estrutural, obtendo desta forma o valor final para a integral J ($J = 20.453 \text{ N} / \text{mm}$) tornando a trinca instável sob tais condições.

4 CONCLUSÃO

Utilizando a análise computacional, os resultados dos testes forneceram as seguintes observações:

A temperatura criogênica em que a peça está submetida faz com que a resistência à fratura do material seja afetada, tornando mais crítica a eminência para propagação da trinca pelo fato do material tender a ter um comportamento frágil nessa região;

A propagação de uma trinca requer um estado de tensões suficiente para que a resistência à tenacidade do material seja atingida, como o elemento estudado está em serviço e por isso existe um estado de tensões associado ao carregamento, a propagação pode não acontecer em um primeiro estágio (somente o carregamento em serviço), mas poderá ocorrer após o contato com a temperatura criogênica.

REFERÊNCIAS

- [1] PALTRINIERI, N.; TUGNOLI, A.; COZZANI, V. Hazard identification for innovative LNG regasification technologies. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 137, p. 18–28, 2015.
- [2] PATEL, H. N.; RYNN P.; WANG X.; DAS B.; PHAM M. Safety and Regulatory Perspective for Floating LNG plant Offshore (FLNG). *Proceedings of OTC Brasil*, 2011
- [3] LEE, K. J.; CHUN, M. S.; KIM, M. H.; LEE, J. M. A new constitutive model of austenitic stainless steel for cryogenic applications. *Computational Materials Science*, v. 46, n. 4, p. 1152–1162, 2009.
- [4] PARK, W. S.; CHUN, M. S.; HAN, M. S.; KIM, M. H.; LEE, J.M. Comparative study on mechanical behavior of low temperature application materials for ships and offshore structures: Part I-Experimental investigations. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 18, p. 5790–5803, 2011.
- [5] PARK, D. K.; KIM, D. K.; KIM, B. J.; SEO, J. K.; PAIK, J. K. Effects of low temperature on ASTM A131: An experimental and numerical study. n. 44939, p. 425–437, 2012
- [6] EHLERS, S.; OSTBY, E. Increased crashworthiness due to arctic conditions - The influence of sub-zero temperature. *Marine Structures*, v. 28, n. 1, p. 86–100, 2012
- [7] KALAN, R. J.; PETTI, J. P. LNG Cascading Damage Study Volume I: Fracture Testing Report. v. I, n. Dezembro, 2011
- [8] MAGALHÃES, K. M. M.; VILASBOAS I. F.; SILVA, D. G.; JUNIOR, A. S.R. Determinação do gradiente térmico em uma placa de aço ASTM A131 GR. EH36 devido ao vazamento de líquido criogênico. In: X CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Salvador, BA, 2007. Anais. São Paulo, ABCM, 2018, p.1-10.

Capítulo 2

Avaliação da viabilidade da obtenção de filamento para impressora 3D a partir de polietileno reciclado

Letícia Noronha da Silva

Sílvia Inês Mombach

Tatiana Rocha

André Canal Marques

Resumo: O processo de impressão 3D é uma manufatura aditiva cada vez mais utilizada. Para a alimentação dessas impressoras são utilizados filamentos poliméricos, sendo PLA o mais utilizado. Como este utiliza matéria prima virgem em sua fabricação, o presente trabalho avalia a possibilidade de substituí-lo por PEAD advindo de sacolas plásticas. Estas sacolas foram preparadas, passando-as através de um cilindro, para então serem extrudadas obtendo-se o filamento. Os filamentos obtidos nos testes iniciais apresentaram-se homogêneos, porém com variações na espessura, prejudicando seu desempenho na impressora por não alimentá-la de forma eficiente.

Palavras Chave: Impressão 3D; Reciclagem; Polímeros.

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D é uma manufatura aditiva que está em crescente utilização. Esta é usada na fabricação de peças por deposição de várias camadas de material, sendo possível obter peças de geometria complexa. Existem vários modelos de impressora, mas o que utiliza filamentos plásticos em sua alimentação é chamado de Modelagem por Fusão e Depósito.

A impressora 3D funciona de maneira similar as impressoras convencionais, para que a impressão ocorra é necessário inicialmente realizar um desenho do objeto em três dimensões com auxílio de softwares e então enviá-lo a impressora. Esta, por sua vez, o divide em várias camadas diferentes em duas dimensões. (JUNIOR, N. A. C. e CASTILLO L. G., 2014).

Em seguida são realizados os últimos ajustes, como dimensão e resolução da peça, medida pela espessura das camadas que serão depositadas. A produção começa pela base do objeto. O cartucho deposita uma fina camada do material sobre uma plataforma. Após a primeira camada, a impressora deposita diversas camadas até o objeto ficar pronto, o tempo de impressão varia de acordo com a complexidade do objeto. (JUNIOR, N. A. C. e CASTILLO L. G., 2014).

Essa deposição se dá através de uma pequena extrusora de bocal metálico, que aquece e puxa um determinado filamento polimérico, que está inicialmente enrolado numa bobina. Esses filamentos são geralmente de ABS e PLA. Podendo ser utilizados também PEAD, PEBD, PS, PP, policarbonato, entre outros. (OLIVEIRA, 2015).

Os filamentos de PLA possuem um alto valor agregado, o que representa um custo elevado para os usuários, pois são fabricados com material virgem. E após a aplicação, estes materiais tem o fim da sua vida útil, sendo descartados e enviados a aterros sanitários.

Esse impacto tanto ambiental quanto econômico pode ser reduzido com a fabricação de filamentos oriundos de materiais recicláveis descartados. A grande questão é se a estrutura e características desses resíduos, como as sacolas plásticas (PEAD), são similares aos filamentos já utilizados nas impressoras 3D conhecidas (PLA).

Para isso, se faz necessário conhecer um pouco de cada polímero. O PLA, por exemplo, é um polímero termoplástico, biodegradável derivado do ácido láctico natural que é um composto orgânico de função mista (ácido carboxílico e álcool), encontrado principalmente no milho e na cana de açúcar, sua obtenção varia de acordo com o fabricante. (ECYCLE, 2016).

Em termos de propriedades o PLA é similar ao poliestireno, porém duro e quebradiço, fazendo-se necessário a adição de plastificantes. É usado na fabricação de filmes, já que pode ser termoconformado e moldado por injeção. (GRANTA DESIGN, 2015).

Apresenta melhores características e resultados em uma impressão 3D, fabricando peças de grande porte e cumprindo com as dimensões da peça desejada, além de não emitir gás e odor, durante a sua extrusão. Seu ponto de fusão está entre 145 e 177°C. (GRANTA DESIGN, 2015).

O filamento de PLA utilizado para a alimentação de uma impressora 3D, pode ter espessura de 1,75 mm e 3,00 mm, variando de acordo com o bico de injeção e modelo de impressora. (3D CLONER, 2016).

O polietileno, por sua vez, apresenta-se de forma parcialmente cristalina e flexível, mas suas características variam conforme a quantidade de fase amorfa e fase cristalina presentes. É quimicamente inerte, frente a outros produtos químicos. É um dos polímeros mais baratos presentes no mercado, proveniente dos monômeros de etileno, o que o torna um dos polímeros mais simples, quimicamente falando. (COUTINHO, F.; MELLO, I.; DE SANTA MARIA, L., 2003).

O polietileno é um polímero termoplástico, obtido por poliadição, mas seus processos variam conforme a estrutura da natureza química do monômero, aplicações finais, etc. E seu ponto de fusão está entre 125 e 132°C. (GRANTA DESIGN, 2015).

Existem diferentes tipos de polietileno, que variam de acordo com sua estrutura química, como a presença ou não de ramificações, bem como seus tamanhos, que interferem na distância entre as cadeias do polímero, alterando suas propriedades, como a densidade, cristalinidade, aplicação, entre outros. (COUTINHO, F.; MELLO, I.; DE SANTA MARIA, L., 2003).

No caso do PEAD existem poucas ramificações na sua cadeia o que possibilita um maior empacotamento, resultando em uma maior densidade do material. Tem como principais características a resistência ao impacto, até em baixas temperaturas, além de ser inerte frente a produtos químicos. Nesse tipo de

polietileno mais linear, o ponto de fusão, a resistência e a dureza são maiores, devido a um maior grau de cristalinidade presente. (COUTINHO, F.; MELLO, I.; DE SANTA MARIA, L., 2003).

Como cada sacola plástica tem sua composição, faz-se necessária a caracterização do material, para tal foram usadas técnicas de DSC e TGA. O ensaio de DSC é chamado de calorimetria diferencial por varredura, usada para a determinação da Tg, Tm, entalpia de fusão e entalpia de cristalização, além do calor específico e da cristalinidade. Já o ensaio de TGA, permite monitorar um ganho ou perda de massa, de acordo com a temperatura e tempo percorridos (MANRICH, 2014).

Depois de se conhecer as propriedades de um polímero, é realizado o seu processamento, utilizando as melhores condições de processo. Na produção de filamentos para a aplicação em impressoras faz-se uso do processo de extrusão.

O processo de extrusão é usado para homogeneizar e moldar a amostra. Dentro da extrusora o material é fundido e forçado a se deslocar através das roscas, sendo expulso pelo bocal que confere o formato desejado através da matriz. No caso da fabricação de filamentos, a matriz possui um pequeno círculo em seu meio, assim o extrudado sai com a forma de um cilindro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Após coletadas, as sacolas passaram por uma estufa a uma temperatura de 100°C por 2 minutos e levadas a um cilindro, onde foram obtidos aglomerados de sacolas plásticas.

Após estes processos, foram feitas análises de DSC e TGA afim de caracterizar o material utilizado, visto que cada sacola possui um aditivo, pigmento, carga distintas, etc. Com os resultados destes ensaios foram estabelecidos os parâmetros de processo.

Para a produção dos filamentos, os aglomerados de sacolas foram adicionados na extrusora da marca AX Plásticos, modelo AX16-DR, de dupla rosca co-rotante. As temperaturas nas zonas de aquecimento variaram entre 135°C e 180°C.

Assim, os aglomerados de sacolas passaram pela extrusora e saíram pela matriz previamente preparada, com espessura próxima de 1,75 mm, na forma de filamentos.

Ao sair da extrusora, esses filamentos foram puxados manualmente e enrolados em uma bobina específica usada em impressoras 3D. Após foram levados à impressora, da marca Cliever CL1. E testados fazendo-se uma varredura de temperatura entre 180 e 250°C.

3 RESULTADOS

A análise de DSC realizada no laboratório de materiais poliméricos (LaPol) na Unisinos mostra que o resíduo de PEAD apresenta temperatura de fusão de 129°C, é um material semicristalino. E seu TGA nos mostra que o resíduo polimérico é composto de 83,93% de polímero, 5,82% de voláteis e 10,03% de cargas inorgânicas.

Fig 1 – Resultado DSC e TGA

Fonte: Autores.

No processo de extrusão foram utilizadas temperaturas de 135°C à 180°C, nas diferentes zonas, afim de obter um filamento polimérico contínuo e homogêneo.

Durante o processo de extrusão foi possível verificar a ocorrência de lentidão e algumas interrupções de extrudado, devido a geração de pressão como o uso do molde de diâmetro pequeno.

Depois da obtenção do filamento, este foi testado na impressora 3D. Nessa etapa ocorreram ajustes de temperatura, sendo possível verificar que o filamento de PEAD reciclado sofre fusão de forma adequada utilizando temperatura de 180°C. Entretanto foi observado que este filamento não alimentou corretamente a impressora por estar com variações no diâmetro, o que impossibilitou que os roletes responsáveis por puxar o fio tivessem a adesão necessário para puxá-lo.

Figura 2 - Desenvolvimento e resultados (A – Sacolas coletadas; B – Sacolas após cilindro; C – Filamentos após extrusão; D – Teste na impressora; E- Filamento processado pela impressora).

Fonte: Autores.

4 CONCLUSÃO

A produção de filamento a base de PEAD oriundo de sacolas plásticas é viável, pois foi possível a obtenção de um filamento através da extrusão das sacolas plásticas previamente compactadas em cilindro. Mas a substituição do filamento de PLA requer outros testes, já que o filamento produzido sofreu fusão de forma adequada, mas devido a variação de espessura causada no final da extrusão, não conseguiu abastecer a impressora de maneira adequada. Portanto, a substituição direta do PLA por sacolas plásticas, ainda não foi possível, para tal, ficam como pontos para continuidade do trabalho o aperfeiçoamento do processo de fiação a fim de se obter um filamento de diâmetro contínuo, capaz de alimentar a impressora de maneira adequada.

REFERÊNCIAS

- [1] 3D CLONER. Filamentos. Disponível em: <<http://www.3dcloner.com.br/suprimentos>>. Acesso em 22 de abril de 2016.
- [2] ASHBY, Mike. GRANTA DESIGN, 2015 - Software. Acesso em: 20 de março de 2016.
- [3] CLIEVER, SOLUÇÕES EM PROTOTIPAGEM. Filamento PLA, 1,75mm. Disponível em: <<http://www.cliever.com.br/produto/filamento-pla-1-75mm-1kg-31>>. Acesso em: 17 de março de 2016.
- [4] COUTINHO F., MELLO I., DE SANTA MARIA L. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/po/v13n1/15064.pdf>>. Acesso em: 25 de março de 2016.
- [5] ECYCLE. Máquina Transforma Lixo Plástico Em Matéria-Prima Para Impressora 3D. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/37-tecnologia-a-favor/1307-maquina-consegue-transformar-o-lixo-plastico-em-materia-prima-para-impressoras-3d.html>>. Acesso em: 22 de março de 2016.
- [6] ECYCLE. PLA: o plástico compostável. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/37-tecnologia-a-favor/738-pla-o-plastico-compostavel.html>>. Acesso em: 23 de março de 2016.
- [7] JUNIOR, N. A. C. e CASTILLO L. G. Impressão 3D na cultura do design contemporâneo. 2014. Disponível em <http://www.ufrgs.br/ped2014/trabalhos/trabalhos/523_arq2.pdf> Acesso em: 24 mar. 2016.
- [8] LONTRA, da Fonseca Gondin Beatriz. Reciclagem mecânica de polietileno de alta densidade obtido a partir de sacolas plásticas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de materiais) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011. Disponível em <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003385.pdf>> Acesso em: 25 mar. 2016.
- [9] MACHADO, Roberta. Equipamentos Transformam Peças De Plástico Em Filamento De Impressoras 3D. Disponível em: <http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/tecnologia/2014/11/05/interna_tecnologia,456040/equipamentos-transformam-pecas-de-plastico-em-filamento-de-impressoras-3d.shtml>. Acesso em: 24 de março de 2016.
- [10] MANRICH, S. Processamento de termoplásticos. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2014.
- [11] MARQUES, Keite. Manufatura aditiva: o futuro do mercado industrial de fabricação e inovação. Disponível em: <http://www.eesc.usp.br/portaleesc/index.php?option=com_content&view=article&id=1934:manufatura-aditiva-o-futuro-do-mercado-industrial-de-fabricacao-e-inovacao&catid=115&Itemid=164>. Acesso em: 22 de abril de 2016.
- [12] OLIVEIRA, Alice Albuquerque e Souza de. O design como ferramenta de tecnologia social: equipamento de processamento de resíduos. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Design de Produto) – Curso de Design de Produto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/126464>> Acesso em: 25 mar. 2016.
- [13] SANTOS, H.M.M., VEIGA, F.J.B., etc. Obtenção de pellets por extrusão e esferonização farmacêutica. Parte I. Avaliação das variáveis tecnológicas e de formulação. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcf/v40n4/v40n4a03.pdf>>. Acesso em 07 de abril de 2016.

Capítulo 3

Reaproveitamento dos resíduos da construção civil na obtenção de membranas cerâmicas para tratamento de efluentes

Adriano Lima da Silva

Carlos Bruno Barreto Luna

Ewerton de Oliveira Teotônio Bezerra

Patricia da Silva Santos

Alexsandra Cristina Chaves

Gelmires de Araújo Neves

Resumo: Membranas são estruturas delgadas que permitem a separação de fases de uma substância por meio do transporte de determinadas espécies químicas. A busca por matérias-primas mais viáveis economicamente é, portanto, necessária. Este trabalho teve como objetivo reaproveitar resíduos de tijolos cerâmicos, para conformação de membranas cerâmicas tubulares. As membranas foram produzidas com argila bentonita (5%) e resíduo de tijolo (95%), sendo as mesmas sinterizadas em temperaturas de 750, 800 e 850 °C. A massa cerâmica foi caracterizada por teste de plasticidade, análise granulométrica (DG), análise química (EDX), análise termogravimétrica (TG) e difração de raios x (DRX) e as membranas por micrografia eletrônica de varredura (MEV), porosidade aparente (ϵ_A) pelo princípio de Arquimedes e ensaio de fluxo tangencial. Os resultados mostraram que o teste de plasticidade da composição apresentou um índice de plasticidade de 12,8%. O MEV evidenciou que a membrana sinterizada a 850 °C apresentou maior porosidade. A porosidade aparente das três membranas sinterizadas a 750, 800 e 850 °C, respectivamente, apresentou-se superior aos 40% recomendados. Os resultados evidenciam boas perspectivas de reaproveitamento desses rejeitos.

Palavras-chave: Sustentabilidade, reaproveitamento, membranas cerâmicas.

1. INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico dos últimos anos aumentou significativamente a produção de bens industrializados e o volume de recursos minerais explorados. Associado a essa grande expansão produtiva, houve um aumento na quantidade de resíduos produzidos, fazendo com que milhões de toneladas de rejeitos sejam desenvolvidos a cada dia em todo o mundo (MENEZES et al., 2009).

O setor da construção civil é um segmento que se destaca pelo elevado desperdício de material e pela geração de resíduos. Tais resíduos são descartados em aterros, no entanto, na estrutura das grandes cidades, não há mais espaços para essas disposições, em virtude da aglomeração de pessoas e alta valorização do espaço físico (RIBEIRO et al., 2007). Diversas alternativas têm sido investigadas nos últimos anos com o intuito de reaproveitar esses resíduos. Dentre essas alternativas, destaca-se a produção de membranas cerâmicas para tratamentos de efluentes.

Membranas são barreiras seletivas que permitem a separação de fases presentes numa substância. Os processos de separação por membranas distinguem-se dos processos de separação convencionais pelo consumo relativamente baixo de energia e por dispensar a adição de agentes químicos. As membranas têm sido empregadas em diversos setores, tanto na indústria química, como na área médica, na indústria alimentícia e farmacêutica, e no tratamento de efluentes industriais e municipais (LIMA et al., 2011).

A filtração por membrana é uma alternativa poderosa para o tratamento de efluentes, visto ser um método rápido, simples e de baixo custo, quando comparado aos métodos tradicionais. A aplicação dessa tecnologia para o tratamento de efluentes industriais implica em economia e pode minimizar os efeitos dos resíduos no meio ambiente (MARTÍ-CALATAYUD et al., 2013). Além disso, as membranas cerâmicas apresentam vantagens por tolerar condições severas de operação em função da estabilidade térmica, química e mecânica (SILVA et al., 2014).

SILVA (2010) reportou que, no caso das indústrias, o tratamento dos seus efluentes, antes da sua deposição no meio ambiente ou em um sistema de esgotamento público, representa um dos seus principais problemas, pois boa parcela desses efluentes é constituída de emulsões de óleo em água, cujos processos comuns para separação dessas emulsões possuem uma série de limitações, seja de ordem energética ou química. O processo que vem recebendo crescente atenção, devido a sua eficiência energética, facilidade de operação, vasta aplicabilidade, dentre outras vantagens, é aquele que utiliza membranas como princípio ativo do seu funcionamento. Com o desenvolvimento e a aplicação de um sistema específico de membranas, sozinho ou em conjunto com outras técnicas, pode-se assegurar a passagem de apenas moléculas específicas, mesmo em situações em que os efluentes possuam um alto teor de óleo.

Portanto, o reaproveitamento dos resíduos da construção civil é de grande importância atualmente. Tanto os aspectos econômicos quanto a poluição ambiental são justificativas para que se aumentem os esforços no sentido de promover a reciclagem desses materiais.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de membranas cerâmicas de baixo custo a partir do reaproveitamento dos resíduos de construção civil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

As matérias-primas utilizadas na confecção das membranas cerâmicas tubulares foram: argila bentonita proveniente da região de Cubati (PB), resíduos de tijolos cerâmicos vermelhos cedidos pela CIMAC, empresa de materiais de construção localizada em Campina Grande (PB), água potável e oleína.

METODOLOGIA

TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE TIJOLOS CERÂMICOS

Os resíduos de tijolos cerâmicos utilizados na pesquisa (Figura 1) foram submetidos a um processo de moagem, objetivando o alcance de um pó cerâmico cuja granulometria fosse capaz de passar pela peneira ABNT nº 325.

A dureza das matérias-primas a moer é um fator importante na seleção do equipamento a ser utilizado para a realização da moagem. Em se tratando dos resíduos de tijolos cerâmicos, que é formado

essencialmente de argila, o processo de moagem utilizando o moinho de bolas é largamente empregado. O moinho de bolas é constituído de uma carcaça de ferro, revestida internamente com blocos de sílex e carregado de corpos moedores (Figura 2) [3].

Figura 1 – Resíduos de tijolos cerâmicos cedidos pela CIMAC.

Figura 2 – Moinho de bolas.

As principais variáveis que influenciam na moagem com esse tipo de equipamento são o tamanho e a carga dos corpos moedores que são colocados no moinho.

OBTENÇÃO DA MASSA CERÂMICA

Os resíduos de tijolos (Figura 1) cerâmicos foram submetidos a um processo de moagem em um moinho de bolas (Figura 2) durante seis horas, objetivando o alcance de um pó cerâmico. Após a moagem, o pó cerâmico e a argila bentonita foram passadas em peneira ABNT nº 325. A formulação da massa cerâmica obedeceu às proporções de 95% para o resíduo de tijolo e 5% de argila bentonita homogeneizada e, logo em seguida, foi realizado o teste de plasticidade. Com as proporções definidas, foi utilizada uma massa total de 2 kg, que foi homogeneizada manualmente por 40 minutos. A massa cerâmica passou por caracterização física, morfológica e mineralógica, assim como pelo teste de plasticidade, que foi realizado segundo as normas NBR 6459/1984, para o limite de liquidez, e NBR 7180/1984, para o limite de plasticidade, em que $IP = LL - LP$.

CARACTERIZAÇÃO DA MASSA CERÂMICA**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA****ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO A LASER (AG):**

Nesse método, é combinada a relação proporcional entre a difração a laser, a concentração e o tamanho das partículas. Para a realização dessa análise, a massa cerâmica foi dispersa em 250 ml de água destilada, em agitador Hamilton Beach modelo N-5000, na velocidade de 17.000 rpm, por 20 minutos. Em seguida, 15 ml foram separados e colocados em dispersor ultrassônico por 10 minutos. Essa dispersão foi colocada em um equipamento CILAS, modelo 1064, em modo úmido, até atingir a concentração ideal, que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (EDX):

A massa cerâmica foi submetida à análise química por fluorescência de raios-X no equipamento EDX 720, da Shimadzu.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG):

A análise termogravimétrica (TG) da massa cerâmica foi realizada em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5 °C/min. A temperatura máxima utilizada na análise térmica foi de 1000 °C.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX):**

A análise por DRX da massa cerâmica foi realizada em equipamento XRD 6000, da Shimadzu. A radiação utilizada foi K do Cu (40kV/30mA), a velocidade do goniômetro foi de 2 °/min e passo de 0,02°. A interpretação foi realizada utilizando os padrões contidos no programa computacional PDF 02 (ICDD, 2003).

CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS

As membranas cerâmicas foram caracterizadas por ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Shimadzu, modelo X550), tendo sido analisada a sua porosidade aparente (ϵ_A) pelo princípio de Arquimedes e avaliada a sua capacidade de filtração por meio do ensaio de fluxo permeado.

Por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura, foi possível avaliar a distribuição dos poros das membranas cerâmicas. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo SuperScan SS500.

Os valores de porosidade aparente das membranas foram obtidos pelo método de imersão, baseado no princípio de Arquimedes, utilizando água como fluido, conforme a norma ASTM C373-88 (1999). O experimento foi realizado em uma balança analítica Mister Toledo AS 20000C e o aparato utilizado foi disponibilizado pelo LTM (Laboratório de Novos Materiais) da UFCG.

As membranas obtidas foram analisadas quanto a sua porosidade aparente (ϵ_A) pelo princípio de Arquimedes.

ENSAIO DE FLUXO TANGENCIAL EM ESCALA DE LABORATÓRIO DAS MEMBRANAS OBTIDAS

As membranas foram analisadas em sistemas de laboratório para a separação em diferentes aplicações e para avaliar a sua eficiência em filtração.

Foram realizados testes iniciais com água destilada. Foi analisado o comportamento do fluxo do permeado em relação à água de alimentação, por meio do gráfico do fluxo permeado pelo tempo.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), na Universidade Federal de Campina Grande.

CONFORMAÇÃO DAS MEMBRANAS

As membranas em formato tubular foram obtidas por extrusão, utilizando-se uma extrusora a vácuo (Figura 3), fabricada pela Verdés, modelo 051. O molde utilizado foi confeccionado em aço VC 131, temperado, o qual permite que as peças extrudadas adquiram a forma tubular com as seguintes dimensões: diâmetro externo 10,5 mm, diâmetro interno 7,5 mm e espessura de parede do tubo em torno de 1,5 mm.

Figura 3 – Extrusora a vácuo.

No processo de extrusão, a mistura cerâmica sofre deformação plástica até ser alcançado o ponto de escoamento. A mistura cerâmica é formada pelo pó cerâmico e um teor de líquido entre 10 e 30%, e essa mistura é forçada pela rosca sem fim da extrusora por meio do orifício de uma boquilha com o formato desejado, produzindo-se dessa forma o corpo cerâmico.

As peças obtidas foram submetidas à duas etapas de secagem. Na primeira etapa, secagem natural durante cinco dias, cobertas com pano úmido. Na segunda etapa, as peças foram levadas a uma estufa com temperatura controlada em torno de 60 °C, por 48h. Passada essa etapa, as peças cerâmicas foram cortadas em um comprimento aproximado de 80 mm.

As membranas cerâmicas foram sinterizadas em forno elétrico (MAITEC). As taxas de aquecimento foram as seguintes: 5 °C/min, a partir da temperatura ambiente até 400 °C; 2 °C/min, de 400 °C até as temperaturas máximas de 750, 800 e 850 °C. Passadas essas etapas, as peças cerâmicas foram cortadas em um comprimento aproximado de 80 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE TIJOLOS CERÂMICOS

O processo de moagem dos resíduos de tijolos cerâmicos foi realizado conforme o previsto, tendo sido atingida a granulometria necessária para que o pó de tijolo moído fosse capaz de ser passar através da peneira ABNT nº 325.

Para a obtenção desses resultados, o resíduo de tijolo foi moído por aproximadamente seis horas contínuas, sendo submetido às cargas dos corpos moedores que estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos corpos moedores utilizados na moagem dos resíduos de tijolos cerâmicos

Diâmetro aproximado (cm)	Quantidade (unidades)	Massa Total (Kg)
1,0 a 2,5	270	6,33
2,6 a 3,5	122	6,65
4,0 a 9,0	68	21,23

OBTENÇÃO DA MASSA CERÂMICA

O peneiramento dos resíduos de tijolo e da argila bentonita foi realizado em um peneirador mecânico, utilizando a peneira ABNT nº 325.

Tabela 2 – Proporção dos componentes na massa cerâmica

Composição X	Porcentagem		Massa para 2000 g de massa total	
	Resíduo – Bentonita		Resíduo – Bentonita	
	95%	5%	950g	50 g

Com os componentes devidamente preparados para formar uma massa total de 2000 gramas, foi realizada uma homogeneização manual por aproximadamente 40 minutos.

TESTE DE PLASTICIDADE

Plasticidade é a propriedade que um sistema rígido possui de deformar-se, sem se romper, pela aplicação de uma força (tensão), e de reter essa deformação quando a força aplicada é retirada. Se o sistema argila-água não fosse adequadamente plástico, não seria possível a moldagem de produtos de cerâmica vermelha por extrusão [9]. Os dados do teste de plasticidade das amostras encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Características da plasticidade do composto

Amostras	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Composição X	31,0	18,2	12,8

Onde LP é o limite plástico, que é o teor de água, expresso em porcentagem do peso de massa seca a 110 °C, acima do qual a massa argilosa pode ser enrolada em rolos, com cerca de 3 a 4 mm de diâmetro e cerca de 15 cm de comprimento, e LL é o limite líquido, que é o teor de água, expresso em porcentagem do peso de massa seca a 110 °C, acima do qual a massa flui como um líquido quando ligeiramente agitada [9].

Como o IP encontra-se entre LL e LP, a massa cerâmica é classificada como plástica, segundo critérios utilizados em mecânica dos solos [10].

O fato da composição ser plástica traz boa previsão de que essa massa será conformada pelo processo de extrusão com sucesso, pois, de um modo geral, pode-se afirmar que argilas com elevada plasticidade deslizam melhor sobre a superfície da hélice, traduzindo-se numa maior pressão e, conseqüentemente, numa melhor homogeneização.

Esse teste foi realizado segundo as normas NBR 6459/1984, para o limite de liquidez, e NBR 7180/1984, para o limite de plasticidade, em que $IP = LL - LP$.

CARACTERIZAÇÃO DA MASSA CERÂMICA

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR DIFRAÇÃO A LASER (AG):

A Figura 5 mostra a distribuição granulométrica das partículas da massa cerâmica.

Figura 5 – Distribuição granulométrica da massa cerâmica

A partir da distribuição granulométrica, observa-se que a massa cerâmica é composta basicamente de argila, silte e areia.

A Tabela 3 representa os dados da análise granulométrica da massa cerâmica, onde D_{10} , D_{50} e D_{90} são porcentagens (10%, 50% e 90%), nas quais o diâmetro das partículas encontra-se abaixo do especificado.

Tabela 3 – Análise granulométrica da massa cerâmica na composição X.

Massa cerâmica	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{médio}$ (μm)
Composição (X)	0,71	3,86	15,28	6,08

Conforme os dados ilustrados na Tabela 3, observa-se que o diâmetro médio das partículas é de 6,08 μm.

Segundo RANDON *et al*, (1993), o tamanho dos poros de uma membrana cerâmica obtida por sinterização de pós pode ser de aproximadamente $\frac{1}{4}$ do diâmetro das partículas do pó com o qual foi preparada. Dessa forma, para preparar uma membrana com um pó cujo diâmetro de aglomerados seja de 6,72 μm, o diâmetro médio dos poros dessa membrana poderá ser de aproximadamente 1,68 μm, cujo valor representa membranas para o processo de microfiltração [8].

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (EDX):

A composição química da massa cerâmica está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química da massa cerâmica.

Tipo de Óxido	Quantidade (%)
SiO ₂	55,328
Al ₂ O ₃	24,933
Fe ₂ O ₃	10,923
MgO	2,381
CaO	1,461
TiO ₂	1,785
K ₂ O	2,544
Outros	0,645

Na Tabela 4, observa-se que as substâncias que estão presentes em maior quantidade na massa cerâmica são a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3). Segundo (Júnior, 2008), no caso dos compostos sílico-aluminosos, que têm como componentes principais os óxidos SiO_2 e Al_2O_3 , a relação recíproca dos mesmos determina o caráter químico do produto, com a predominância de SiO_2 , de caráter ácido; quando Al_2O_3 é majoritário, são chamados de básicos, o que caracteriza um composto sílico-aluminoso [14].

A massa cerâmica contém um teor relativamente elevado de óxido de ferro, devido à própria composição da matéria do resíduo de tijolo cerâmico, que é caracteristicamente rico nesse elemento, figurado em sua coloração avermelhada. Baixos teores de MgO e CaO são importantes, pois esses atuam como agentes fundentes. Esses óxidos em elevadas quantidades poderiam interferir no processo de sinterização, favorecendo o surgimento de formação de fase líquida e o provável entupimento de poros [19].

DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX):

A análise por difração de raios X para a massa cerâmica está esquematizada na Figura 6. O composto apresenta picos referentes aos planos cristalinos das fases mineralógicas do quartzo, da caulinita, dos silicatos de alumínio, potássio e hidróxido de cálcio. Esses resultados, juntamente com os dados da análise química por fluorescência de raios x, permitem classificar o composto como caulinitico [11].

Figura 6: Difratoograma da Composição X.

Tabela 5: Cálculo e identificação dos picos baseado nas distâncias interplanares.

Picos	2θ	d(Å) calculado	d(Å) teórico	Argilomineral atribuído
1	8,9399	9,8914	9,99	Mica
2	10,6394	8,3149	8,25	Caulinita
3	12,3572	7,1626	7,15	Caulinita
4	17,8585	4,9666	4,98	Mica
5	19,8191	4,4795	4,47	Mica
6	20,9355	4,1262	4,12	Caulinita
7	23,7475	3,7466	3,73	Caulinita
8	26,6580	3,3438	3,34	Quartzo
9	28,1202	3,1732	3,20	Mica
10	36,6688	2,4507	2,48	Caulinita
11	39,5792	2,2769	2,28	Caulinita
12	42,6865	2,1181	2,12	Quartzo
13	45,8922	1,9773	1,98	Caulinita
14	50,2370	1,8160	1,80	Quartzo
15	54,9329	1,6714	1,67	Quartzo

Podemos verificar, por meio da Tabela 5, a presença de picos referentes à Caulinita, caracterizada pelas distâncias interplanares 8,25 Å; 7,15 Å; 4,12 Å; 3,73 Å; 2,28 Å; de Quartzo, nas distâncias interplanares de 3,34 Å; 2,12 Å; e de Moscovita, caracterizada pelas distâncias interplanares de 3,20 Å; 4,98 Å; 4,47 Å. As distâncias interplanares foram calculadas mediante a lei de Braag.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

Termogravimetria ou análise termogravimétrica é uma técnica destrutiva no ramo de análises térmicas, na qual se monitora a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas. Seu princípio de funcionamento é simples: analisar a perda ou a agregação de massa à amostra em temperaturas variadas. Em geral, os métodos térmicos encontram ampla aplicação tanto no controle de qualidade quanto na pesquisa de produtos industriais [12].

A análise termogravimétrica da massa cerâmica foi realizada para que, a partir dessa, fossem definidas as temperaturas de queima das membranas.

Figura 7: Curvas de TGA/ATD obtidas para o composto X.

A análise termogravimétrica revela que a perda de massa ficou entre 5,00 e 5,50% para queima até aproximadamente 1.000 °C. Essa perda de massa está associada à perda de água livre e adsorvida, perda de água de hidroxilas dos argilominerais e oxidação da matéria orgânica, influenciando na porosidade da cerâmica após queima, conforme demonstrado [21].

Analisando as curvas de ATD, pode-se observar a presença de um único pico exotérmico à 902 °C, correspondente à nucleação de mulita.

Conforme Tabela 5, podemos inferir os intervalos e as suas respectivas perdas de massa baseados na curva TG acima.

Tabela 5: Intervalos de perda de massa do composto X.

Massa Cerâmica	Etapas	Variação Temperatura (°C)	Perda de Massa	
			(%)	(mg)
Composto X	1	42,26 - 165,94	1,741	0,487
	2	165,94 - 697,39	2,578	0,721
	3	697,39 - 1001,67	0,726	0,203

A Figura 7 ilustra a curva da análise termogravimétrica (TG) da massa cerâmica. E na Tabela 5, verifica-se que há três estágios de perda de massa. O primeiro, entre 42,26 e 195,4 °C, possivelmente relacionado à eliminação de água adsorvida e estrutural do material, outro estágio de 195,4 a 697,39 °C, relacionado à perda de matéria orgânica e hidroxilas presentes na composição e, finalmente, o último estágio, entre 697,4 e 1001,67 °C, que ocorre em consequência da decomposição de carbonatos e hidróxidos. A perda de massa total apresentada pela composição foi de aproximadamente 5,045%. Com essa análise, foi possível definir as temperaturas de sinterização das membranas, que foram 750 °C, 800 °C e 850 °C.

CONFORMAÇÃO DAS MEMBRANAS

O processo de extrusão para a obtenção das membranas foi realizado com sucesso, assim como foi previsto pelo resultado do teste de plasticidade.

Após a conformação, as membranas foram submetidas a duas etapas de secagem. Na secagem natural, elas ficaram durante cinco dias cobertas com pano úmido. Na segunda etapa, as peças foram levadas a uma estufa com temperatura controlada em torno de 60 °C, por 48h. As membranas conformadas e devidamente secas encontram-se na Figura 7.

As peças cerâmicas foram cortadas com comprimento aproximado de 80 mm e encaminhadas para as devidas caracterizações e para os posteriores testes com os efluentes.

Figura 7 – Membranas conformadas

DIFRAÇÃO DE RAIOS X PARA A MASSA CERÂMICA SINTERIZADA

Os difratogramas obtidos para as massas cerâmicas sinterizadas estão esquematizados na Figura 8.

Figura 8 – Difratogramas da massa cerâmica sem queima e sinterizadas a 750 °C, 800 °C e 850 °C.

Analisando os difratogramas comparativos com a massa cerâmica sem queima é possível notar que: nas três temperaturas de sinterização, verifica-se uma intensidade maior dos picos característicos do Quartzo; com o aumento da temperatura, os picos da Caulinita perderam intensidade; os picos de quartzo ficaram mais intensos no decorrer do aumento da temperatura de sinterização; com a análise dos difratogramas, é possível perceber que o comportamento é muito semelhante para as composições de queima e sem queima da massa cerâmica, sendo diferentes apenas as intensidades dos picos, caracterizadas por meio dos arquivos quartzo (JCPDS 46-1045), caulinita (JCPDS 14-0164) e mica/ilita (JCPDS 83-1808).

CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV):

As micrografias obtidas com essa técnica, para cada temperatura de sinterização, encontram-se na Figura 10. Elas ilustram a área de corte da membrana.

Figura 10 – Micrografia, com aumento de 1500X, da área de corte da membrana sinterizada a 750 °C (a), 800 °C (b) e 850 °C (c).

Analisando as micrografias, é possível perceber que, apesar da membrana sinterizada à 750 °C, possuem uma distribuição de poros bastante uniforme, quando comparadas as outras sinterizadas em temperaturas mais elevadas. A partir de 800° C, não é possível estimar com precisão o tamanho dos poros em nenhum dos casos, uma vez que não há uniformidade de distribuição. Ainda é possível observar que, com o aumento da temperatura de sinterização, há um aumento da porosidade das membranas.

POROSIDADE APARENTE, (ϵ_A) PELO PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

Os dados da Tabela 6 evidenciam os dados obtidos pelo ensaio da porosidade aparente.

Tabela 6: Dados aferidos com base no ensaio de porosidade aparente, pelo princípio de Arquimedes.

Temperatura de Queima (C°)	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Peso Submerso (g)
750	0,63	0,79	0,47
800	0,72	0,85	0,65
850	0,86	1,03	0,79

Figura 13: Ensaio de Porosidade Aparente.

Os ensaios foram realizados utilizando uma amostra de cada membrana, na respectiva temperatura de sinterização (750°C, 800°C e 850°C), após a obtenção dos pesos seco, úmido e imerso. Sendo assim, foi possível o cálculo da porosidade aparente e porosidade total das membranas, a partir da equação (1) abaixo:

$$P_{ap} = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} * 100$$

Onde:

P_{ap} = Porosidade Aparente

P_s = peso seco

P_u = peso úmido

P_i = peso imerso.

A tabela 7: evidencia a porosidade aparente de cada membrana na sua respectiva temperatura de Sinterização:

Tabela 7: Porosidade Aparente

Temperatura de sinterização (°C)	Porosidade aparente (%)
750	50
800	65
850	70,83

Observando os valores contidos na Tabela 7, verifica-se que a amostra sinterizada a 850 °C apresentou uma porosidade superior à amostra sinterizada a 750 °C, e que a membrana sinterizada 800 °C apresentou uma porosidade intermediária entre as temperaturas de sinterização.

Acredita-se que a elevação da temperatura de sinterização provocou um aumento da porosidade, bem como provocou um aumento no diâmetro médio dos poros das membranas. Isso deve-se provavelmente ao escoamento da fase líquida formada, preenchendo os poros menores e consequentemente aumentando os poros maiores [19]. De maneira geral, verifica-se que com o aumento da temperatura de sinterização favoreceu um aumento da porosidade e um aumento no tamanho dos poros remanescentes.

ENSAIO DE FLUXO TANGENCIAL EM ESCALA DE LABORATÓRIO DAS MEMBRANAS

Na Figura 14 estão apresentados os resultados do fluxo permeados das membranas, submetidas à sinterização de 750, 800 e 850°C, respectivamente.

Figura 14: Fluxo permeado das membranas submetidas à sinterização de 750, 800 e 850°C.

A membrana que obteve maior fluxo permeado foi a sinterizada a 750 °C. Por outro lado, as membranas sinterizadas a 800 e 850°C apresentaram resultados similares no fluxo, ou seja, não há variação significativa. Esse comportamento no fluxo parece contraditório, uma vez que a porosidade aumentou com a elevação da temperatura de sinterização, conforme Tabela 7. Acredita-se o fluxo permeado é mais influenciado pelo tamanho dos poros do que pela própria porosidade. Nesse sentido, especula-se que as membranas sinterizadas nas temperaturas de 800 e 850°C apresentaram poros menores, em comparação a sinterizada a 750°C. Consequentemente, houve uma maior nível de obstrução dos poros nas membranas sinterizadas a 800 e 850°C, provocando um fluxo permeado baixo.

4. CONCLUSÕES

As membranas cerâmicas tubulares produzidas a partir da incorporação de resíduos de tijolos cerâmicos foram realizadas com sucesso para uma incorporação de 95% de resíduo. Os resultados de caracterização indicaram que a massa cerâmica pode ser utilizada como matéria-prima promissora para a obtenção de membranas cerâmicas na escala de microfiltração. Foi constatada também a forte influência da temperatura de sinterização com os poros das membranas por meio das micrografias, que indicaram mudança na distribuição dos poros com o aumento dessa temperatura de sinterização. Acredita-se, ainda, que a elevação da temperatura de sinterização provocou um aumento da porosidade, bem como um aumento no diâmetro médio dos poros das membranas.

REFERÊNCIAS

- [1] “A ONU E A POPULAÇÃO MUNDIAL”. < <http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-populacao-mundial/> >. Acesso em 09 de fevereiro de 2014.
- [2] ANGULO, S. C. et al. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. *Revista Engenharia Sanitária e ambiental*, v. 16, n. 3, julho/setembro 2011, pág. 299-306.
- [3] VIEIRA, Andressa de Araújo Porto. Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2005.
- [4] DIAS, João Fernando. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [5] HABERT, A. C. BORGES C. P. NOBREGA R. Processos de Separação por Membranas. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2006.
- [6] PAIVA, C. L. A. COSTA, A. C. F. M. VIEIRA, L. G. F. LIRA, H. L. LEITE, A. M. D. KIMINAMI, R. H.G.A. MAIA, D. F. Preparação de membranas cerâmicas de zircônia para separação óleo/água. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- [7] SILVA, Adriana A. et al. Caracterização de membranas cerâmicas preparadas em laboratório visando sua utilização na separação óleo/água. VII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, pág. 1338-1340.
- [8] RANDON, J. , JULBE, A., DAVID, P., JAAFARI, K., ELMALEH, S.; Computer Simulation of Inorganic Membrane Morphology, *Journal of Colloid and Interface Science*, nº 161, p. 384-388, 1993.
- [9] CAMPOS, L. F. A.; MACEDO, R. S. de; KIYOHARA, P. K.; FERREIR, A. H. C. Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. *Cerâmica*, vol.45, n.295, São Paulo, 1999.
- [10] CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações fundamentais, Livros Técnicos, vol. 1, Rio de Janeiro, 1994.
- [11] SILVA, Paula Luciana Bezerra da; Obtenção e caracterização de cerâmica vermelha utilizando na matéria-prima resíduo argiloso do rerrefino de óleos minerais; Dissertação (Mestrado); Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [12] LIMA, R. C. O. LIRA, H. L. NEVES, G. A. SILVA, M. C. SILVA, C. D. Aproveitamento do resíduo de serragem de granito para fabricação de membranas cerâmicas de baixo custo. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 6 (2011) 163.
- [13] TORGAL, F.Pacheco; JALALI, Said; Construção sustentável. o caso dos materiais de construção. Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional, Coimbra, Portugal Universidade de Coimbra.
- [14] JÚNIOR, Gilberto Rocha Santiago. ESTUDOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO ALUMÍNIO COMO MATÉRIA-PRIMA CERÂMICA. 2008. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará.
- [15] SILVESTRE, Ramón. Et All. Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses. *Construction and Building Materials* 45 (2013) 115-122.
- [16] SILVA, Paula Luciana Bezerra da. TESE DE MESTRADO. *Obtenção e caracterização de cerâmica vermelha utilizando na matéria-prima resíduo argiloso do rerrefino de óleos minerais*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. 2010
- [17] Ozel, E. Turan, S. Çoruh, S. Ergun, O. N. Production of Brown and black pigments by using flotation waste from copper slag. *Waste Management and Research* 24 (2006) 125.
- [18] BENITO, J.M.; CONESA, A.; RUBIO, F.; RODRÍGUEZ, M.A., Preparation and characterization of tubular ceramic membranes for treatment of oil emulsions, *Journal of the European Ceramic Society*, 25 (2005) 1895-1903.

- [19] CHAVES, A. C.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A.; SILVA, F. A.; LIMA, R. C. O.; FRANÇA, K. B.; Obtenção e caracterização de membranas cerâmicas tubulares a partir de massas incorporadas com argila, caulim e quartzo, *Cerâmica*, 59 (2013) 192-197.
- [20] PINHEIRO, J.N.F.; HOLANDA, B.C.A. Processing of red ceramics incorporated with encapsulated petroleum waste. *Journal of Materials Processing Technology*, v.209, p.5606–5610, 2009.
- [21] VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. *Cerâmica*, v. 55, p. 332-336, 2009.

Capítulo 4

A corrosão na indústria cimenteira: problemas com corrosão nos filtros de processo dos fornos de clínquer

Leomar Oliveira dos Santos

Josy Eliziane Torres Ramos

Resumo: Nos processos industriais, os equipamentos estão suscetíveis à corrosão, que pode torná-los inadequados para o uso e assim causar prejuízos, sejam eles ambientais, financeiros ou à saúde humana. Na indústria cimenteira, o equipamento mais afetado pela corrosão em toda a linha de produção do cimento é o filtro de processo do forno de clínquer, visto que o meio na qual o filtro está inserido é bastante agressivo. Estudos por meio de análises e medições mostram que a principal causa dessas corrosões é devido o ponto de orvalho ácido. O estudo em questão propõe como controlar o ponto de orvalho ácido, bem como mostra medidas de prevenção aos ataques corrosivos no filtro.

Palavras-chave: Corrosão; Processo de produção; Filtro; Ponto de orvalho ácido.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um dado material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1998). O processo de corrosão, literalmente, consome o material, reduzindo a capacidade de carga e causando concentração de tensões. O ferro, por exemplo, oxida-se facilmente quando exposto ao ar e à umidade.

Nas indústrias acontecem perdas de produção e paradas da unidade por corrosão de equipamentos e estruturas, visto que os mesmos são feitos de metais e/ou ligas metálicas. A problemática gira em torno da indústria cimenteira, na qual é mostrado como se originam as corrosões em um ponto importante do processo de fabricação de cimento, o filtro de processo do forno de clínquer, bem como as soluções cabíveis no combate à essas corrosões.

Pode-se constatar que a principal causa dessas corrosões é o Ponto de Orvalho Ácido (P.O.A.), onde o mesmo designa a temperatura a qual um determinado vapor presente no ar ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação, o chamado ponto de orvalho. Em outras palavras, é a temperatura a qual um determinado vapor que está em suspensão no ar começa a se condensar.

O estudo mostra como controlar o ponto de orvalho ácido, propondo medidas de prevenção aos ataques corrosivos no filtro.

2 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

É importante o conhecimento sobre como é fabricado o Cimento Portland (ver Figura 1), já que a raiz dos problemas envolvendo corrosão faz parte do processo de fabricação.

O nome “Portland” foi dado em 1824 pelo químico britânico Joseph Aspdin, pelo simples fato do cimento apresentar cor e propriedades semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

Figura 1: Esquema da linha de produção de Cimento Portland.

Fonte: <http://blogdocumento.blogspot.com.br/2015/09/fluxogramas-de-fabricacao-de-cimento.html>.

O processo de fabricação de Cimento Portland consiste basicamente na extração da matéria-prima (calcário) da jazida, com auxílio de máquinas e explosivos, seguindo-se a sua britagem e mistura com outros minérios. Essa mistura é dosada e, em um moinho, é transformada em um “cru” chamado farinha. A seguir, passa por uma torre de pré-aquecimento e pré-calcinação e, logo após, por um forno giratório, transformando-se em clínquer, sendo cozido a 1450°C. Finalmente esse clínquer é moído e misturado a gipsita e outras adições, transformando-se no cimento, sendo armazenado e pronto para ser entregue ao consumo, em sacos ou a granel (NOGARA, 2005).

No decorrer de toda a linha de produção atuam filtros, geralmente de mangas, responsáveis pela filtragem dos detritos e gases para liberar o ar para a atmosfera o mais límpido possível, da parte do processo onde estão inseridos.

3 OS FILTROS DE PROCESSO DOS FORNOS DE CLÍNQUER

Os filtros de processo são, em geral, filtros de mangas que participam do processo de produção. Um filtro de mangas é basicamente composto por câmara superior, corpo central e moega de recolhimento, operando em condições contínuas, sendo dotado de sistema automático de limpeza das mangas filtrantes. Na câmara superior, as flautas direcionam o ar comprimido ao sistema, às mangas. No corpo do filtro, as mangas são montadas sobre gaiolas armadas, que visam à manutenção de seu perfil cilíndrico quando em operação (VENTEC AMBIENTAL, 2008).

Figura 2: Filtro de processo, de mangas.

Fonte: <http://www.plamont.com.br/pt/obra-pt/11>.

O filtro de processo do forno de clínquer faz o despoeiramento entre a moagem da farinha e o forno. Os gases (com particulado) vindos do moinho e do forno são direcionados ao filtro através de um exaustor, que por sua vez, direciona esses gases a chaminé, dissipando-os na atmosfera. São alguns desses gases que, na presença de água, fazem do filtro de processo do forno o mais suscetível a corrosão, quando em determinadas condições de operação.

4 PROBLEMAS COM CORROSÃO PRESENTES NOS FILTROS

A queima de combustível com enxofre em sua estrutura molecular resulta na oxidação do mesmo, formando o gás SO_2 (dióxido de enxofre), o qual reage com o oxigênio residual dos gases sujos quando a temperatura cai para algo abaixo de 300°C , formando assim o gás trióxido de enxofre (SO_3) (PACHECO, 2006).

Nos processos de produção do clínquer, especificamente nos fornos, se encontra o gás SO_3 , também denominado anidrido sulfúrico ou óxido sulfúrico que, por sua vez, devido à forte afinidade por água do gás SO_3 , haverá a formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Tanto o SO_2 em condições secas, como o ácido sulfúrico ataca determinados tipos de materiais das mangas filtrantes por sulfonação. Contudo, a formação de ácido sulfúrico tem um agravante, pois ao reagir com o metal da gaiola (ferro ou outro) há liberação do gás hidrogênio, o qual ataca a manga filtrante (PACHECO, 2006).

Então, com a presença da água (H_2O) há a formação de ácido sulfúrico, podendo assim aumentar a taxa de corrosão dos equipamentos na qual esses gases são direcionados – os filtros de processo dos fornos, tornando-os os mais suscetíveis a corrosão. Sua formação se dá pela reação:

Pode-se montar um triângulo da corrosão para o filtro, de acordo com a Figura 3:

Figura 3: Triângulo da corrosão para o filtro do forno de clínquer.

Fonte: Elaborada pelos autores.

a) A Oxidação das Partes Metálicas em Função do Ponto de Orvalho Ácido

Segundo análises de possíveis causas dessas corrosões e medições feitas por técnicos da indústria de cimento, pode-se constatar que a principal delas é o Ponto de Orvalho Ácido (P.O.A.).

Observou-se que, com a temperatura abaixo da temperatura de P.O.A. ocorreu uma correspondente queda da porcentagem de umidade presente nos gases com a condensação de parte do vapor do ácido. De forma mais simplificada, a uma temperatura de trabalho de 110°C, o P.O.A. seria 111,69°C, então, perceberia-se condensação ácida a qualquer temperatura abaixo de 111,69°C, iniciando a oxidação das partes metálicas da estrutura, flautas e gaiolas (BARBOSA e SILVA, 2013), como mostra a Figura 4.

Figura 4: Corrosões causadas por condensação ácida (a) na tampa da câmara, (b) nas flautas e (c) nas gaiolas.

Fonte: Arquivo pessoal.

b) Consequências das Corrosões nos Filtros

Uma gaiola danificada decorrente da corrosão causa furos, rasgos na manga, fazendo com que o material e os gases que passa pelo filtro entrem na manga através desses furos e causem, assim, poluição ao meio ambiente. Como consequência, vêm os prejuízos financeiros, visto que a produção para, porque o filtro fica ineficiente e tem que parar devido as mangas danificadas. Nem o forno nem o moinho de cru rodam com o filtro parado. Sem contar nos danos à saúde de quem trabalha, que vai respirar um ar poluído.

c) Soluções Cabíveis

Para uma faixa de segurança e de manter os equipamentos seguros da corrosão causada pelo ácido sulfúrico, uma solução é trabalhar com uma margem mínima de 5,0°C acima do ponto de orvalho ácido, evitando condensações por oscilações no processo.

Como o filtro é uma parte do processo, manutenções no mesmo são descartadas durante o funcionamento do forno, visto que o forno para se o filtro parar. Em virtude disso, manutenções como troca de mangas, gaiolas, vedações das tampas e alguma eventual ação corretiva/preventiva para sanar desgastes devido corrosão na parte interna do filtro só são possíveis durante paradas pré-definidas de manutenção do forno. Essas ações podem ser a pintura (da forma correta: com limpeza, revestimento primário ou primer, e acabamento) ou a substituição da peça corroída por outra nova.

5 CONCLUSÃO

Conforme exposto, as problemáticas da corrosão nos processos industriais causam prejuízos ambientais, financeiros e à saúde do homem, dependendo do caso, de modo que essa proposição necessita de estudo, investigação e controle.

A avaliação do aspecto químico da filtração se faz indispensável nas investigações de falhas de projetos ou de solução de problemas crônicos dos sistemas de filtração, seja por entupimento, seja por alta emissão de pó devido ao ataque químico dos elementos filtrantes. No entanto, faz-se necessário reforçar, que é fortemente recomendável, a avaliação concomitante do aspecto mecânico, como por exemplo, dentre muitos itens, a eficiência do sistema de limpeza. Uma vez que a eficiência depende também do aspecto mecânico do filtro, o combate aos ataques corrosivos se torna obrigação das fábricas, a fim de que todos inseridos no meio (o financeiro da empresa, a saúde humana, o meio ambiente) ganhem com isso.

REFERÊNCIAS

- [1] BARBOSA, M. G; SILVA, C. L. Eficiência De Um Filtro De Mangas No Tratamento De Gases Oriundos De Caldeira De Queima De Biomassa Sólida. Fórum Ambiental da Alta Paulista, Bauru, SP. 16 p. 2013.
- [2] BATTAGIN, Arnaldo F. Uma breve história do cimento Portland. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em 18 de março de 2017.
- [3] GENTIL, Vicente. Corrosão. 3. ed. 373 p. Rio de Janeiro: LTC, 1998.
- [4] Manual Técnico de Instalação, Operação e Manutenção, Filtro de Mangas. Ventec Ambiental. 14 p. Indaiatuba, SP, 2008.
- [5] NOGARA, Luís Sérgio. Processo de Fabricação do Cimento. 39 p. Aracajú, SE, 2005.
- [6] PACHECO, Tito de Almeida. O Aspecto Químico da Filtração Industrial. Cerâmica Industrial, Cachoeirinhas, RS. 10 p. Setembro, 2006.

Capítulo 5

Densificação do combustível nuclear $\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ fabricado por mistura a seco

Artur Cesar de Freitas

Alberto Ermanno dos Santos Sansone

Michelangelo Durazzo

Elita Fontenele Urano de Carvalho

Resumo: A rota de mistura mecânica a seco é o processo mais atrativo para realizar incorporação de absorvedores devido à sua simplicidade. Utilizando esta rota, o presente trabalho investigou o comportamento de sinterização do combustível misto $\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$. A sinterização de combustível $\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ ocorreu com dois estágios nas curvas de taxa de retração, chamado de bloqueio de sinterização, também visto na sinterização do combustível $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$. As partículas de óxido de érbio solubilizam na matriz de UO_2 , deixando um poro característico e um gradiente de concentração ao redor, causado pelo efeito Kirkendall. Estes resultados confirmam que a sinterabilidade depende diretamente da qualidade da homogeneização dos pós, como visto na literatura.

Palavras-chave: urânio, érbio, combustível nuclear, efeito Kirkendall

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de melhorar o desempenho do reator através de comprimentos de ciclo mais longos e melhor uso de combustível tornou-se aparente desde o início da geração comercial de energia nuclear. Entre as várias modificações introduzidas, está o aumento do enriquecimento inicial do combustível. Assim, o ganho de reatividade do combustível no início da vida útil do núcleo deve ser compensado pela introdução de material adicional absorvedor de nêutrons(1).

A função do veneno queimável é controlar a população de nêutrons e pode ser utilizado de forma homogênea e integrada ao combustível nuclear. Para tanto, o elemento químico que terá essa função precisa capturar nêutrons decorrentes da fissão do urânio e o isótopo formado pela reação nuclear, não(2). Com o veneno queimável distribuído na pastilha, é possível ter um controle mais fino da população de nêutrons, colocando-o em posições e permitindo uma inserção menor das hastes de controle, ajudando a moldar a distribuição de potência no caroço do reator.

O gadolínio é o elemento químico mais utilizado como veneno queimável, pela sua alta capacidade de absorção de nêutrons, propriedade esta chamada secção de choque e tem sido utilizado pela maioria dos fornecedores de combustível. Seu desenvolvimento progressivo forneceu uma grande base de dado(3). Outro elemento químico utilizado comercialmente é o érbio. Seu interesse potencial é que o Er-167 apresenta uma secção de choque de absorção de nêutrons relativamente baixa, em relação ao gadolínio, que leva a uma cinética de consumo relativamente lento(4,5). O gadolínio é mais adequado para aplicação como um absorvedor integrado para ciclos até 18 meses, enquanto o érbio, é indicado para uso em ciclos de 24 meses ou mais(6).

Gd₂O₃ é usado comercialmente em uma proporção de até 10% em peso homogeneamente misturado com UO₂ e distribuído em 3 a 6% das barras de combustível. Er₂O₃ é misturado com UO₂ na proporção de 1 a 2,5% em peso e distribuído em 20 a 30% das barras de combustível(3). No entanto, existem estudos para combustíveis integrados UO₂-Er₂O₃ usando concentrações até 12% Er₂O₃ enriquecido com o isótopo Er-167.

No que diz respeito à fabricação de combustíveis dopados com absorvente queimável, vários estudos relacionados com os efeitos da adição de veneno, como Gd₂O₃, sobre o comportamento de imersão em UO₂ foram publicados(7-11). Como não há relato do comportamento de sinterização das pastilhas de UO₂ dopado com Er₂O₃, o objetivo deste trabalho é estudar o combustível nuclear UO₂-Er₂O₃, com adição de 1 a 10% do veneno queimável. A distribuição de érbio na pastilha combustível após a sinterização é avaliada, bem como a possível formação de diferentes fases além da fluorita.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Todas as amostras de UO₂-Er₂O₃ utilizadas neste trabalho foram misturadas a seco em misturador agitador Turbula T2C durante 1 hora. Os teores de Er₂O₃ escolhidos neste trabalho foram 1,0, 2,5, 4,0 e 10,0 (% em peso), com adição do lubrificante sólido ADS (distearato de alumínio na proporção de 0,2% em peso).

Os pós UO₂ e ADS foram fornecidos pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil) e são rotineiramente utilizados na fabricação atual de pastilhas de UO₂(12,13). O pó de UO₂ foi obtido a partir do UF₆ através da conversão de TCAU (tricarbonato de amônio urânio) (14). O pó de Er₂O₃ foi fornecido pela Alfa-Aesar com pureza de 99,99%. Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos pós de UO₂ e Er₂O₃ foram obtidas com um Jeol JSM 60102A com elétrons secundários e são mostradas na Figura 1. A forma das partículas de UO₂ (Figura 1a) é típica dos pós derivados de TCAU como esperado(11-13). Os dados físico-químicos do pó de UO₂ estão apresentados na tabela 1 e na tabela 2, os traços de impurezas.

Figura 1 – Imagem do MEV (elétrons secundários) mostrando tamanho de partícula e morfologia: (a) UO₂; (b) Er₂O₃.

Tabela 1 - Dados físico-químico do pó de UO₂

Análise	Valor	Especificação
O/U	2,0818	2,08 - 2,30
Utotal (%)	87,574	≥86,8
Enriquecimento em peso de 235U (%)	4,137	4,10 - 4,15
Umidade (% de massa)	0,15	≤ 0,4
Área de superfície específica (m ² /g)	5,0	2,5 - 6,0
Densidade aparente (g/cm ³)	2,2	2,0 - 2,6
Escoabilidade (s/50g)	4,6	≤ 10
D50 (µm)	30,04	< 200

Tabela 2 - Traços de impureza em µg/gU

Impurezas	F	Al	Ca	B	Fe	Ni	Si	Gd
UO ₂	5,312	1,777	4,212	< 0,2	15,24	0,421	6,916	0,2
Especificação	≤ 100	≤ 250	≤ 25	≤ 0.5	≤ 100	≤ 50	≤ 100	≤ 1

O tamanho médio de partícula foi calculado por um analisador de difração CILAS laser modelo 1064, operando com laser de 820 nm e utilizando água como meio líquido e tetra pirofosfato de sódio como agente dispersante. O UO₂ possui 50% das partículas com diâmetro médio de até 30,04 µm. Já o Er₂O₃ possui partículas menores com D50 igual 11,04 µm.

O pós foram compactados em matriz cilíndrica com pressões de 295 a 353 MPa. Para cálculo de densidade aparente, pastilhas a verde foram pesadas individualmente em balança semianalítica (0,0001g) e seu volume foi determinado de forma geométrica. A densidade teórica (DT) das misturas foram calculadas considerando densidades dos componentes UO₂, Er₂O₃ e ADS como 10,96 g/cm³(15), 8,65 g/cm³(16) e 1,009 g/cm³(17), respectivamente. As densidades aparentes das pastilhas a verde variaram de 51 a 52% do DT com diâmetro médio e altura de 10,34 mm e 11,2 mm, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 - Densidade a verde das pastilhas combustível.

% em massa de Er2O3	Densidade a verde (g/cm ³)	DT (g/cm ³)	Densidade a verde (%DT)
UO ₂ puro	5,55	10,75	51,64
1,0	5,50	10,72	51,31
2,5	5,47	10,68	51,23
4,0	5,50	10,64	51,71
10	5,39	10,48	51,44

As amostras foram sinterizadas em um dilatômetro Setaram Setsys 1700 a 1973 K por 240 min sob atmosfera de hidrogênio puro. A taxa de aquecimento foi de 5 K/min. As densidades sinterizadas foram determinadas medindo-se o peso das amostras imersas em água, de acordo com o princípio de Arquimedes[18].

A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX). As amostras foram lixadas sequencialmente em lixas de grade de 400 a 1200 e polidas com diamante de 3 e 1 μm . Inicialmente foi realizada a análise por microscópio óptico (Zeiss-Axio Imager M2m), com luz polarizada e campo claro e depois a pastilha UO₂-Er₂O₃ com 10% em massa foi recoberta com carbono para análise no MEV-FEG (Jeol-JSM-6701F), no qual foi usado com elétrons secundários e retroespalhados. O mapeamento do érbio e do urânio foi realizado com tempo de contagem por 120 minutos, com tensão de 15KV. O DRX foi realizado em pastilhas sinterizadas em pó usando radiação Cu-K α em um difratômetro Brock D8 Advance. Padrões de difração foram obtidos em temperatura ambiente tanto com fendas antiderrapantes e divergentes de 1,0 mm e fenda de recepção de 0,4 mm. A intensidade espalhada foi medida do ângulo 2 θ de 10° a 90°, com 10 segundos por passo de 0,02°.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2a mostra as curvas de contração linear da sinterização de pastilhas de UO₂-Er₂O₃. A primeira região das curvas (300-450°C) mostra uma expansão que pode ser explicada pela formação de UO₂ a partir da redução da relação O/U.

Figura 2 - Efeito da sinterização do UO₂ puro e UO₂-Er₂O₃: (a) Retração linear; (b) taxa de retração.

Para uma adição pequena, como 1% em peso, o Er₂O₃ resulta em 2% maior de retração do que o UO₂ puro. Adições moderadas de Er₂O₃ (entre 2,5 e 4% em peso) causam retração total comparável à

sinterização do UO_2 puro. Com 10% em peso de Er_2O_3 ocorre uma diminuição na retração de cerca de 1%. Quanto à taxa de retração durante a sinterização (Figura 2b), o valor máximo ocorreu a 1290°C . As taxas de retração, no entanto, foram menores quanto maior o teor de Er_2O_3 . A taxa de retração é máxima em 1535°C e atinge um novo pico em 1620°C para 10% Er_2O_3 .

Este comportamento de sinterização de dois estágios, aqui denotado por dois picos nas curvas de taxa de retração, também é tipicamente observado no sistema $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ (7-11). Esse fenômeno, denominado “bloqueio de sinterização”, foi observado quando o pó de Gd_2O_3 foi adicionado ao pó de UO_2 derivado do TCAU pela via da mistura mecânica a seco(10,11). O primeiro pico ocorre quando há a sinterização das partículas $\text{UO}_2\text{-UO}_2$. Quando ocorre a formação da solução sólida, formando $(\text{U,Er})\text{O}_2$, há um novo pico de retração.

A figura 3 mostra a micrografia da pastilha com UO_2 puro (figura 3a) e com a adição de 10% de Er_2O_3 (figura 3b). A figura 3a apresenta poros característicos de materiais sinterizadas, com poros redondos e alguns disformes, com formato de meia lua(12), possivelmente oriundos de grandes aglomerados que existem em menor fração. Já a figura 3b apresenta uma quantidade de poros visivelmente maior, diminuindo a densidade.

Figura 3 – Imagens feitas com microscopia óptica das pastilhas sinterizadas: (a) UO_2 puro; (b) $\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$.

A figura 4 mostra imagens do MEV com elétrons secundários (figura 4a) e elétrons retroespalhados (figura 4b) os poros formados da pastilha sinterizada $\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ com maior detalhe e o mapeamento por EDS dessa mesma região, para poder ser comparado. O Er_2O_3 adicionado ao UO_2 causa a formação de “ilhas” de pequenos poros agrupados ao redor de grandes poros. Essas ilhas não estão presentes nas pastilhas sinterizadas de UO_2 puro e são frequentes com a adição de 10% de Er_2O_3 . Pode-se notar que os poros formados têm morfologia parecida com o pó de Er_2O_3 apresentados na figura 1, com seus cantos agudos e irregulares. A figura 4b mostra que existe uma maior concentração de érbio em torno dos poros agrupados, denotada pelas áreas mais escuras na imagem de elétrons retroespalhados. O mapeamento por EDS apresentado nas figuras 4c (érbio) e 4d (urânio) mostram que um gradiente de concentração de érbio é formado quando as partículas de érbio se solubilizam na estrutura do UO_2 ao redor dos poros.

Figura 4 – Imagens feitas com (a) elétrons secundários; (b) retroespalhados; mapa de EDS para o érbio (c) e urânio (d) da pastilha sinterizada UO₂-Er₂O₃

Estes resultados sugerem que os aglomerados de poros são formados por aglomerados originais de partículas de Er₂O₃ que não foram completamente quebrados durante o processo de mistura dos pós. Estes aglomerados de partículas são absorvidos pela matriz de UO₂ dando origem a poros agrupados observados. As partículas primárias de Er₂O₃ se difundem na matriz de UO₂, deixando para trás os poros como resultado do efeito Kirkendall. A mistura a seco com partículas de Er₂O₃ e UO₂ forma gradientes de concentração ao redor do poro formado pela partícula percussora de Er₂O₃, conforme revelado pelas imagens da figura 3.

O combustível (U,Er)O₂ forma uma solução sólida substitucional e o Er₂O₃ se dissolve na estrutura de fluorita do UO₂. Assim, as DT's para o sistema UO₂-Er₂O₃ foram calculadas usando a equação 1, desenvolvida por Fedotov et al.(19). Para o sistema UO₂-Er₂O₃, a diminuição da densidade sinterizada é suave e quase linear, como mostra a figura 5, diferentemente do sistema UO₂-Gd₂O₃(11), que tem uma queda abrupta da retração e da densidade da pastilha sinterizada. Com base nos requisitos de especificação do combustível UO₂-Gd₂O₃ (93,5 a 96% DT(20)), 4% em peso de Er₂O₃ ou menos poderiam ser incorporados adequadamente ao combustível nuclear, uma vez que a porcentagem da DT está dentro da especificação.

$$DT_{(U,Er)O_2} = 10,9616 - 0,0175 \times (\%mássica Er_2O_3)$$

Figura 5 - Densidade sinterizada e teórica das pastilhas de UO₂ puro e UO₂-Er₂O₃. Efeitos comparados com o limite de especificação do UO₂-Gd₂O₃.

A Figura 6 mostra os padrões de difração de raios X obtidos a partir de pastilhas sinterizadas de UO₂-Er₂O₃. Não foram observados picos de Er₂O₃ nos padrões de difração, o que indica que o érbio foi dissolvido na estrutura de fluoreto de UO₂. No entanto, em vez de formar uma solução sólida de fase única, os picos da segunda fase podem ser observados. Esta segunda fase tem o mesmo conjunto de reflexões que a primeira, mas deslocado para a direita (como visto mais claramente com 10% em peso de Er₂O₃), ou seja, tem também uma estrutura do tipo fluorita, mas com um menor parâmetro reticulado.

Figura 6 – Difração de raios X das pastilhas analisadas. Na parte inferior, as reflexões das estruturas dos pós que foram usados para fabricar as pastilhas

A formação de uma segunda fase em torno das partículas de Er₂O₃ originalmente presentes pode possivelmente dificultar a difusão do érbio para a rede de fluorita do UO₂, o que pode ter deslocado a solubilização do érbio para temperaturas mais altas quando comparado com a temperatura em que ocorre a solubilização no caso do gadolínio. Mais trabalho precisa ser realizado para estudar a presença desta fase no sistema UO₂-Er₂O₃ e seu papel no mecanismo de bloqueio de sinterização observado para este combustível misto.

4. CONCLUSÃO

O comportamento de sinterização do combustível UO₂-Er₂O₃ foi semelhante ao relatado para o combustível UO₂-Gd₂O₃, conforme literatura, ocorrendo em dois tempos com dois picos nas curvas de taxa de contração. No entanto, o efeito é menos pronunciado para o Er₂O₃.

Para pequenos conteúdos, como 1% em peso, a presença de Er₂O₃ melhora a sinterização, resultando em alta retração, até 2% maior do que o puro UO₂. Adições moderadas de Er₂O₃ (entre 2,5 e 4% em peso) causam retração total comparável à sinterização de UO₂ puro. Altas doses de Er₂O₃, como 10% em peso, causam uma diminuição na retração de cerca de 1%. Com base no requisito de especificação para o combustível UO₂-Gd₂O₃ (93,5 a 96% TD), pode ser realizada a sinterização com materiais Er₂O₃ de até 4% em relação ao método mecânico seco para misturas mecânicas secas pós UO₂ e Er₂O₃.

A melhor sinterabilidade do combustível UO₂-Er₂O₃ quando comparado ao combustível UO₂-Gd₂O₃ é atribuída às características próprias das partículas de pó de Er₂O₃ usadas aqui, que formam aglomerados que são mais facilmente quebrados durante a mistura com o pó de UO₂. Estes resultados confirmam que a sinterabilidade depende diretamente da qualidade da homogeneização dos pós, como visto anteriormente. Portanto, é obrigatório desenvolver um procedimento melhorado para a mistura mecânica a seco dos pós com alto grau de homogeneidade.

Uma segunda fase foi experimentalmente detectada no sistema UO₂-Er₂O₃, mas seu impacto no comportamento de sinterização deste combustível misto ainda não foi esclarecido. Mais trabalhos sobre este assunto estão em andamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro a este trabalho fornecido pela CAPES-Eletronuclear.

REFERÊNCIAS

- [1] W.K. Anderson, J.S. Theilacker, Neutron absorber materials for reactor control, USAEC, Naval Reactors. Division of Reactor Development, Washington, D.C. 1962.
- [2] DUDERSTADT, J. J.; HAMILTON, J. L. Nuclear Reactor Analysis. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [3] International Atomic Energy Agency, Characteristics and use of urania-gadolinia fuels, Vienna, Austria, 1995. IAEA-TECDOC-844
- [4] R.L. Simmons, N.D. Jones, F.D. Popa, D.E. Mueller, J.E. Pritchett, Integral Fuel Burnable Absorbers with ZrB₂ in PWRs, Nucl. Tech. 80, 3, (1988) 343-348. <https://doi.org/10.13182/NT88-A34058>
- [5] A. Jonsson, Initial physics evaluation of erbium as a burnable absorber in a PWR, Trans. Am. Nucl. Soc. 61 (1990) 340-341.
- [6] M. Asou, J. Porta, Prospects for poisoning reactor cores of the future, Nucl. Eng. Design. 168 (1997) 261-270. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(96\)01322-2](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(96)01322-2)
- [7] R. Manzel, W.O. Dörr, Manufacturing and irradiation experience with UO₂/Gd₂O₃ fuel, Am. Ceram. Soc. Bull. 59 (1980) 601-603.
- [8] R. Yuda, K. Une, Effect of sintering atmosphere on the densification of UO₂-Gd₂O₃ compacts, J. Nucl. Mater. 178 (1991) 195-203.
- [9] K.W. Song, K.S. Kim, J.H. Yang, K.W. Kang and Y.H. Jung, A Mechanism for the Sintered Density Decrease of UO₂-Gd₂O₃ Pellets Under an Oxidizing Atmosphere, J. Nucl. Mater. 288(2001) 92-99. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00721-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00721-2)

- [10] M. Durazzo, F.B.V. Oliveira, E.F. Urano de Carvalho, H.G. Riella, Phase studies in the $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ system, *J. Nucl. Mater.* 400 (2010) 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.03.001>
- [11] M. Durazzo, A.M. Saliba-Silva, E.F. Urano de Carvalho, H.G. Riella, Sintering behavior of $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ fuel: Pore formation mechanism, *J. Nucl. Mater.* 433 (2013) 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.09.033>
- [12] D.R.Costa, F.J. Ezequiel, R.Gonzaga, S.H. Bernardelli, Individual influence of Al_2O_3 and Nb_2O_5 on grain growth of UO_2 sintered pellets manufactured at INB. International Nuclear Atlantic Conference. Associação Brasileira de Energia Nuclear-CNEN. Brazil. 2013.
- [13] M. Durazzo, A.C. Freitas, A.E.S. Sansone, N.A.M. Ferreira, E.F. Urano de Carvalho, H.G. Riella, R.M. Leal Neto, Sintering behavior $\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ mixed fuel, *J. Nucl. Mater.* 510 (2018) 603–612. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.08.051>
- [14] H. Assmann, W. Dörr, Microstructure and Density of UO_2 for Light Water Reactors As Related to Powder Properties, *Mater. Sci. Monogr.* 16 (1983) 707–718.
- [15] Inorganic Crystal Structure Database, Al, ICSD Collection Code 647594. FIZ Karlsruhe Leibniz Institute for Information Infrastructure. http://www2.fiz-karlsruhe.de/icsd_home.html?&cHash=0997f6804664b7e6fa8012358eef7f08
- [16] Inorganic Crystal Structure Database. Al, ICSD Collection Code 39185. FIZ Karlsruhe Leibniz Institute for Information Infrastructure. http://www2.fiz-karlsruhe.de/icsd_home.html?&cHash=0997f6804664b7e6fa8012358eef7f08
- [17] M. D.Larrañaga, R.J. Lewis, R.A. Lewis, Hawley's Condensed Chemical Dictionary, Sixteenth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2016, pp. 55. doi: 10.1002/9781119312468.ch1
- [18] ASTM B962-08, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
- [19] A.V. Fedotov, E.N. Mikheev, A.V. Lysikov, V.V. Novikov, Theoretical and experimental density of $(\text{U,Gd})\text{O}_2$ and $(\text{U,Er})\text{O}_2$. *Atomic Energy* 113 (2013) 429–434. <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9657-3>
- [20] L.R. Santos, M. Durazzo, E.F. URANO DE CARVALHO, H.G. RIELLA, Effect of $\text{Al}(\text{OH})_3$ on the sintering of $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ fuel pallets with addition of U_3O_8 from recycle. *J. Nucl. Mater.* 493. 30–39. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.05.050>

Capítulo 6

Análise da microestrutura e da dureza da liga de alumínio A.380 sob diferentes teores de estrôncio

Bernardo Lohmann Guimarães

Elisson Jobbins de Arruda

Luciano Augusto Lourençato

Resumo: Neste trabalho estudou-se o comportamento mecânico e a microestrutura de três ligas de alumínio, sendo uma pura e as outras duas produzidas a partir da liga A380.1, cada uma possuindo um percentual diferente de estrôncio em sua composição, 200ppm e 600ppm. As três ligas foram vazadas em moldes metálicos, possibilitando assim a produção de corpos de prova para as seguintes etapas do trabalho. Preparou-se as amostras para a realização de ensaios, tendo em vista a caracterização das propriedades mecânicas de cada condição obtida. Para avaliar a dureza alcançada por cada uma das peças, foi adotado o método de ensaio de dureza Rockwell B. Para a determinação e observação microestrutural, foi realizada a caracterização metalográfica para todas as condições estudadas.

Palavras-chave: Ligas de Alumínio. Estrôncio. Microestrutura. Rockwell B.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria moderna existe a necessidade de uma evolução e de uma atualização constante dos métodos produtivos, visando a diminuição de custos, o aumento da eficiência e da qualidade dos produtos. O desenvolvimento de novos materiais faz parte do cotidiano de uma empresa competitiva, buscando a substituição de um material já utilizado por outro de menor custo com melhores propriedades mecânicas, como por exemplo o menor peso. Assim sendo, surgem pesquisas a respeito do aperfeiçoamento das propriedades dos materiais e métodos de produção.

O alumínio é um dos materiais mais abundantes do planeta Terra. Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (1), a alumina constitui cerca de 15% da crosta terrestre, tornando as reservas minerais quase ilimitadas, sendo a bauxita do minério industrial mais importante para a obtenção da alumina, a matéria prima para a obtenção do alumínio. Dentre as propriedades do alumínio, as que mais se destacam são: baixa densidade (fornecendo um peso menor para as mesmas peças feitas com outros metais), boa resistência à oxidação, alta proporção de resistência mecânica para o peso, altamente maleável (facilita produção, transporte, armazenamento), boa condutibilidade térmica e elétrica e fácil de reciclar. A combinação da abundância e das características do alumínio fazem dele o segundo metal com maior consumo anual na indústria, logo atrás do ferro.

Outra característica muito importante do alumínio é sua grande capacidade de se combinar com outros metais. A diversidade de ligas existentes amplia muito as aplicações desse metal, possibilitando a adequação segundo as exigências físicas e mecânicas do projeto. Devido ao grande número de ligas já criadas, há uma dificuldade de se estudar todas igualmente, sendo algumas menos usuais deixadas de lado por pesquisadores. Dentro de uma determinada liga existe uma série de outros elementos, onde a combinação das concentrações dos mesmos regradará o comportamento e a resposta mecânica dela. A liga A.380 é um exemplo de uma liga em desenvolvimento, onde nota-se poucos trabalhos que envolvem o processo manipulação da porcentagem de estrôncio presente em sua composição química, sendo ele o enfoque deste trabalho.

Este trabalho apresenta como objetivos realizar a avaliação e comparação das possíveis alterações na microestrutura da liga sob estudo para os diferentes percentuais de estrôncio adicionados nas ligas, da dureza Rockwell B obtida em cada uma das condições apresentadas e determinar se os procedimentos realizados resultam em aumento ou diminuição da resistência mecânica para as ligas A.380 modificadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre (4), porém este material começou a ter valor e maior destaque dentro da engenharia apenas no final do século 19, devido a algumas dificuldades. A principal barreira na produção de alumínio antes do início do século 20 é que esse metal não é simplesmente encontrado em sua forma elementar na natureza, e sim combinado com outros elementos. O minério que fornece alumínio é a bauxita, onde o metal é encontrado na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3), ou popularmente conhecido como alumina. Devido às limitações tecnológicas e científicas da época, as dificuldades e os custos para se obter alumínio eram elevados, tornando os processos ineficientes e inviáveis (4).

As principais características do alumínio e de suas respectivas ligas que as fazem ser economicamente atrativas são a aparência (acabamento, superfície), baixo peso (ou densidade), resistência mecânica moderada e alta resistência à corrosão (4). Além dessas características, destacam-se o fato de que o alumínio é um material não tóxico e que é altamente reciclável, tornando-o um material interessante do ponto de vista ecológico (3).

2.2 A LIGA A380

A liga A380 é uma liga modificada da classe 3xx.x, e possui composição química de acordo com a tabela 1, onde os dados são dados em percentual de massa segundo ASM (4):

Tabela 1 - Composição química da liga A380 (dados em porcentual de massa)

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Outros
380	7,5-9,5	2,0	3,0-4,0	0,5	0,1	0,5	3,0	0,35	0,5

Fonte: ASM (2002)

Essa liga em especial fornece um ótimo balanço entre custo de material, resistência moderada. Possivelmente esse é um dos motivos que a tornam bastante difundida e utilizada nas indústrias de fundição. Geralmente é comercializada após algum processo de reciclagem ou refusão, e possui tolerâncias bastantes amplas para seus constituintes. Esses e outros motivos tornam-na uma liga bastante vantajosa, no aspecto econômico e ambiental.

2.3 A ADIÇÃO DE ESTRÔNCIO NA LIGA A380

A baixa reatividade com o ambiente, a facilidade da estocagem, menor reatividade com refratários e o fato de que não ocorre produção de fumos, fazem do estrôncio o elemento modificador mais utilizado atualmente (7). Segundo ABAL (1), ele é adicionado como modificador nas ligas de fundição para fins de modificar a morfologia do silício precipitado, de plaquetas poligonais para plaquetas arredondadas, fazendo com que ocorra uma melhora nas características mecânicas das peças fundidas.

Nas ligas de alumínio, a adição do estrôncio resulta em uma diminuição da nucleação da fase eutética do silício, devido ao fato de ele inibir a nucleação dos mesmos. O número de nucleações diminui rapidamente com a adição crescente do estrôncio até um ponto crítico, este que varia dependendo da composição da liga, e adições acima deste ponto crítico não apresentam redução adicional significativa na nucleação. As propriedades mecânicas ideais para as ligas de alumínio são atingidas com teores de estrôncio em torno de 0,012% em peso, no entanto existem outros estudos que defendem que o teor de estrôncio deve ficar entre 0,005% e 0,010% do peso total (5).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material que foi utilizado no estudo é uma liga comercial reciclada designada como A380, esta que nos foi disponibilizada por meio de lingotes. Foi determinado que seriam analisadas três ligas com diferentes teores de estrôncio, a primeira pura (sem nenhuma adição de estrôncio), uma com 200ppm e a outra com 600ppm, onde suas designações serão liga 0, liga 1 e liga 2, respectivamente. O estrôncio adicionado às ligas está disponível na forma de uma outra liga de composição química 90wt%Al-10wt%Sr, a qual foi obtida comercialmente na forma de varetas. O refinador de grãos que será adicionado às ligas também está disponível do mesmo modo, com a liga de composição química 94wt%Al-5wt%Ti-1wt%B, esse refinador será utilizado nas duas ligas e sua quantidade foi definida para que a porcentagem final de titânio fosse 0,2% sobre a massa das ligas.

Foi realizado um balanço de massas da liga A380 bruta, da liga que contém o estrôncio e também da que contém o refinador de grãos, a fim de se obter os desejados teores previamente definidos.

O refinador de grãos e o modificador de fase eutética foram adicionados logo após a total fusão da liga bruta dentro do forno, então deixados em banho durante cinco minutos, para se obter a total dissolução dos elementos químicos, e em seguida foi realizado cada um dos vazamentos. Estes foram realizados em moldes metálicos de diâmetro interno aproximadamente igual a 31 mm, o comprimento de 250 mm.

As composições químicas das duas ligas modificadas foram atestadas por meio de uma análise química, com a utilização de um espectrômetro no Laboratório de Tixotomografia do DEF/FEM/UNICAMP, foram realizadas 7 análises e o valor médio encontrado é que foi o considerado para as ligas. Os resultados encontrados para a liga 1 e 2 estão demonstrados na tabela 2, em porcentagem de massa.

Tabela 2 - Composição química média, em porcentagem de massa, das ligas 1 e 2

Elemento	LIGA 1 (%)	LIGA 2 (%)		Elemento	LIGA 1 (%)	LIGA 2 (%)
Alumínio	83,493	83,679	Oi	CROMO	0,0090	0,0099
Silício	8,570	8,01		ESTANHO	0,3073	0,2983
Cobre	3,270	3,49		TITÂNIO	0,2353	0,2386
Magnésio	0,059	0,060		CHUMBO	0,1495	0,1469
Ferro	0,777	0,865		ESTRÔNCIO	0,0142	0,0576
Manganês	0,111	0,109		CÁLCIO	0,0004	0,0005
Níquel	0,174	0,164		BORO	0,0017	0,0023
Zinco	2,831	2,867				

Todos os lingotes foram torneados até atingir o diâmetro de 29 mm e, com a utilização de uma serra fita, cortados em amostras de altura aproximada de 10 mm. Devido ao fato de os corpos de prova apresentarem dimensões relativamente grandes nas superfícies que foram analisadas, não foi necessário a realização do embutimento das peças.

Todas as amostras foram lixadas e polidas até apresentarem uma qualidade superficial suficiente para ser possível a realização da análise metalográfica das microestruturas de cada uma.

Posteriormente à análise metalográfica, também foi realizado um ensaio de dureza nos corpos de provas, a fim de se comparar os resultados alcançados entre os diferentes lotes de amostras, o método de ensaio que foi selecionado para tal comparação foi o ensaio de dureza Rockwell B.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a etapa da análise metalográfica foi possível notar que entre as amostras selecionadas houve notáveis diferenças nas microestruturas formadas durante o processo de solidificação.

Para fins de comparação, a figura 1 mostra a análise metalográfica realizada por Ferreira(6) para a liga em sua forma bruta. Nas figuras 2 e 3, é possível verificar as microestruturas presentes nas amostras de 200ppm e 600ppm de estrôncio, com a utilização de uma lente para a ampliação de 100x.

Figura 1: Estrutura metalográfica da liga pura, com ampliação de 100x.

Fonte: Ferreira (6)

Na figura 1, Ferreira(6) constata que a microestrutura da liga é formada por regiões claras, compostas pela fase Al- α , que se encontram envoltas por estruturas aciculares de tons mais escuros, estas que se tratam da combinação da fase eutética Al-Si e do intermetálico Fe- β . Pode-se supor que devido ao fato de o crescimento e nucleação do Al-eutético ocorrer adjacente às dendritas de Al-primário, não é possível diferenciar claramente as estruturas dendríticas do Al- α .

Figura 2: Estrutura metalográfica da liga modificada com 200ppm de estrôncio, com ampliação de 100x.

Figura 3: Estrutura metalográfica da liga modificada com 600ppm de estrôncio, com ampliação de 100x.

Como comprovação de que a adição do estrôncio modifica a estrutura da liga, nas micrografias das figuras 2 e 3, vale destacar as microestruturas do alumínio primário que estão em formas de rosetas equiaxiais cercadas pela fase eutética Al-Si bastante refinada, quando feita comparação com a liga pura.

Segundo Ferreira(6), a melhor diferenciação entre o alumínio primário e o eutético é um resultado do refinamento eutético e uma indicação da alteração da forma do mecanismo de nucleação ocorrido devido a inclusão do estrôncio como elemento de liga. Esta reação se deve ao fato de que quando o Sr interage com as partículas de fosforeto de alumínio, ele impede que o Si continue a nuclear próximo da região do Al primário, fazendo com que ele passe a nuclear de outras formas e alterando também o modo do Al eutético, segundo Nogita(8).

Ao analisar as figuras 1 e 2, é possível perceber que não ocorre uma mudança microestrutural muito significativa entre os dois casos, sendo assim, pode-se considerar que a amostra que foi modificada com 600ppm de estrôncio apresenta uma condição de supermodificação.

Por meio das imagens 4 e 5 é possível ter uma melhor visão das microestruturas presentes nas amostras, elas foram retiradas com o auxílio de uma lente com grau de aumento de 500x, sendo, respectivamente, as mesmas com adição de estrôncio nas taxas de 200ppm e 600ppm.

Figura 4: Estrutura metalográfica da liga modificada com 200ppm de estrôncio, com ampliação de 500x.

Figura 5: Estrutura metalográfica da liga modificada com 600ppm de estrôncio, com ampliação de 500x.

Nas figuras 4 e 5 é possível perceber com clareza o refinamento da microestrutura da fase eutética Al-Si, comprovando a eficácia na modificação da fase eutética através da adição de estrôncio.

Segundo afirma Furlan(7), a supermodificação por Sr é difícil de ser detectada por meio da metalografia, sendo seus efeitos mais perceptíveis quando analisadas as propriedades mecânicas da liga.

Para a verificação dos efeitos da adição do estrôncio sobre a dureza da liga, foi realizado o teste de dureza Rockwell B, os resultados encontrados podem ser visualizados no gráfico 1.

Gráfico 1: Resultados de Dureza Rockwell B obtidos durante o ensaio.

Fazendo uma análise dos dados plotados no gráfico 1, é possível perceber que a adição de 200ppm de estrôncio na liga fez com que houvesse um leve incremento no valor da dureza em comparação com a liga pura, já na liga 2, onde foi feita uma supermodificação nas microestruturas da liga, pode-se perceber que o valor da dureza decaiu, mostrando que tal valor de modificação extrapolou o limite e não trouxe melhoria neste quesito.

5 CONCLUSÕES

Os efeitos da adição de diferentes teores de estrôncio na liga A.380 foram estudados neste trabalho e algumas conclusões puderam ser entendidas a partir deste estudo, sendo elas:

A modificação da fase eutética do silício mostrou-se mais eficaz com teores próximos a 200ppm;

A micrografia da liga com 600ppm de estrôncio mostra indícios de que um início de supermodificação dessa fase;

A liga que recebeu a adição de 200ppm de estrôncio conseguiu mostrar um acréscimo nos valores de sua dureza HRB, quando comparada com a liga pura;

Já a liga de 600ppm de estrôncio obteve um resultado que mostrou que a supermodificação alcançada agravou em uma diminuição significativa dos valores de dureza.

REFERÊNCIAS

- [1] ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). Características físico-químicas. 1. ed. São Paulo, 2006.
- [2] ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). Características físico-químicas. 1. ed. São Paulo, 2006.
- [3] ASKELAND, D. R; FULAY, P. P; BHATTACHARY, D. K. Essentials of Materials. Science and Engineering. 2010.
- [4] ASM HANDBOOK. Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs. ASM International, 2004.
- [5] DASGUPTA, R; BROWN, S.G; MAREK, S. Analysis of overmodified 356 aluminum alloy. Transactions AFS, vol.96. p. 297-310, 1988.
- [6] FERREIRA, J. P. G. Estudo microestrutural e reológico da liga reciclada de alumínio A380 modificada pela adição de estrôncio. 106 f. Dissertação - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.
- [7] FURLAN, T. F. Influência do teor de estrôncio na modificação da liga A356. 215 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- [8] NOGITA, K; MCDONALD, S. D.; DAHLE, A. K. Eutectic Modification of Al-Si Alloys with Rare Earth Metals. Materials Transactions, v.45, p.323-326, 2004.

Capítulo 7

Análise da influência da quantidade de ZrO_2 no tamanho de grãos de Al_2O_3 em compósitos cerâmicos de zircônia em matriz de alumina

Isabel Christina Franco Silva

Daniel Alessandro Nono

Janaina Pereira Mendes

Renata Lopes Gonçalves de Souza

Maria do Carmo de Andrade Nono

Resumo: Nanogrãos de zircônia favorecem o aumento das propriedades mecânicas da alumina, devido principalmente ao mecanismo de tenacificação. No entanto, estudos recentes apontam que efeitos secundários também favorecem o aumento das propriedades mecânicas, como o efeito pinning, ou ancoramento. Neste trabalho são apresentados os resultados das análises dos tamanhos médios dos grãos de matriz de alumina em compósitos alumina-zircônia. Os compósitos foram obtidos por misturas de suspensões defloculadas dos pós. As quantidades de zircônia 3Y-TZP nanoparticulada adicionadas foram 5%, 8.5%, 12%, 15.5% e 18.5 % em massa. Os pós foram compactados por prensagem isostática posteriormente sinterizadas a 1550oC. As imagens dos pós e das microestruturas foram obtidas por MEV e FEG. As curvas de distribuição foram obtidas por medições feitas nas imagens. Os resultados mostraram que os tamanhos médios de grãos diminuíram com o aumento da zircônia, provando o efeito pinning.

Palavras-chave: compósito zircônia-alumina, tamanho de grãos, efeito pinning, microestrutura.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por dois ou mais materiais, cujo objetivo principal é combinar as propriedades individuais de cada componente, com a finalidade de produzir um novo material com as propriedades superiores de todos os seus componentes.

A alumina (Al_2O_3) ou óxido de alumínio, é um material que alcançou notável importância tanto no ramo da cerâmica tradicional como na cerâmica avançada, devido as suas excelentes propriedades, tais como: alta dureza, boa resistência ao desgaste, excelente estabilidade contra o ataque químico e oxidação e boa estabilidade térmica.

A alumina apresenta fragilidades, como ausência de deformação plástica e baixa tenacidade, o que dificulta sua aplicação. Assim, os compósitos de matriz de alumina com inclusões de zircônia têm diversas vantagens, pois favorece um aumento nas propriedades mecânicas do compósito.(6)

O efeito pinning ou ancoramento, ocorre devido ao decréscimo da taxa de difusão dos íons de alumínio e oxigênio na interface dos grãos de alumina. Este decréscimo é fruto da presença de nanogrão. Deste modo, microestruturas com grãos pequenos são obtidas, fornecendo peças com propriedades mecânicas elevadas.(7)

Neste trabalho, são apresentados os resultados de estudos preliminares da influência dos tamanhos de grãos da quantidade de ZrO_2 tetragonal (zircônia tetragonal estabilizada com 3 % mol de Y_2O_3) em matriz de alumina, com quantidades variáveis de ZrO_2 .

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas quatro composições diferentes de zircônia na matriz de alumina sendo de 5%, 12%, 15,5% e 18,5% em massa.

Os compósitos cerâmicos foram produzidos com pó de alumina α CT 3000 SG, fabricada pela Almatiss, de tamanho sub-micrométrico e pó de zircônia 3Y-TZP nanoparticulada, fabricada pela Shandong Zhongshun Sci. & Tech. Devel. Co. Ltd., China. Também foram utilizados compostos orgânicos, sendo eles ácido Oleico e PABA (ácido 4-Amino benzóico), a fim de garantir a desaglomeração das partículas do pó obtido. Assim como, o óxido de magnésio para atuar como inibidor de crescimento de grãos da alumina.

Os pós foram misturados em um moinho de bolas com álcool isopropílico durante 19 horas, com o objetivo de desaglomerar (destruir aglomerados). Não sendo utilizada a técnica convencional que consiste na mistura/moagem, que promove a mistura, mas pode alterar as distribuições granulométricas dos pós com a destruição também de agregados. Depois o pó foi seco em uma estufa na temperatura de 110°C por 12 horas.

A conformação se deu primeiramente por prensagem uniaxial, seguida por prensagem isostática. O processo de sinterização foi de 1550°C por 2h, no forno CARBOLITE modelo HTF1800 com taxa de aquecimento constante de 10 °C/min.

Os pós e as suas misturas foram caracterizados por FEG (Field-emission microscopy), marca TESCAN, modelo VEGA 3, onde foram fixados em uma fita de carbono e passaram por uma deposição de ouro à 40 A por 30 s.

Para a análise da microestrutura foram obtidas seções transversais dos corpos de prova de cerâmica sinterizada de todas as composições, na forma de barras, obtidas na cortadeira metalográfica de precisão, da marca Buehler, modelo ISOMET 1000 com disco de diamante da marca, os quais foram embutidos em baquelite.

Com os corpos-de-prova embutidos realizou-se o lixamento dos materiais em lixa de gramatura 320, 600, 800 e 1200 com o intuito de deixar o material completamente plano e sem riscos. Em seguida, as amostras foram polidas com pasta de diamante de grana 3 .10-6m, 1 10-6m e ¼ 10-6m conferindo uma superfície espelhada.

Para a revelação dos grãos nas microestruturas, as amostras das cerâmicas sinterizadas polidas foram submetidas ao tratamento térmico ao ar na temperatura de 1450 °C, por 30 minutos, com taxa de aquecimento e resfriamento de 10 °C/min.

As Figuras 5 e 6 foram obtidas pelo MEV marca TESCAN, modelo MIRA 3 (microscópio eletrônico de varredura) e as figuras 7 e 8 foram obtidas pelo FEG.

Todas as superfícies das amostras receberam uma camada condutora elétrica de ouro, depositada por sputtering pelo equipamento DENTON VACUUM, modelo Desk 2, com corrente de 40 A por 30 s.

Para a discussão da micrografia o tamanho de grão de alumina foram medidos através do programa Image J versão 1.51p e os histogramas foram obtidos no software Origin 2017 64 bit.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1a, 1b, 2a e 2b apresentam as micrografias dos pós defloculados e misturados.

Figura 1 – (a) Micrografia pó 95 %, em massa de Al_2O_3 e 5 %, em massa de ZrO_2 . (b) Micrografia pó 91,5%, em massa de Al_2O_3 e 8,5 %, em massa de ZrO_2 .

Figura 2 – (a) Micrografia pó 88%, em massa de Al_2O_3 e 12 %, em massa de ZrO_2 . (b) Micrografia pó 81,5%, em massa de Al_2O_3 e 18,5 %, em massa de ZrO_2 .

As micrografias comparando-se as morfologias das microestruturas são apresentadas nas Figuras 3a, 3b, 4a e 4b.

Figura 3 – (a) Micrografia da cerâmica sinterizada 95%, em massa de Al_2O_3 e 5 %, em massa de ZrO_2 . (b) Micrografia da cerâmica sinterizada 91,5%, em massa de Al_2O_3 e 8,5 %, em massa de ZrO_2 .

Figura 4 - (a) Micrografia da cerâmica sinterizada 88%, em massa de Al_2O_3 e 12 %, em massa de ZrO_2 . (b) Micrografia da cerâmica sinterizada 84,5%, em massa de Al_2O_3 e 15,5 %, em massa de ZrO_2 .

Diferenças morfológicas nas partículas dos pós foram identificadas nas Figuras 1a, 1b, 2a e 2b. A amostra com composição de 8,5% de ZrO_2 apresenta uma faixa de tamanhos de partículas superior a $10 \times 10^{-6}\text{m}$, conforme Figura 1b. As demais amostras apresentaram tamanho médio de partícula inferior a $5 \times 10^{-6}\text{m}$. Essa diferença provavelmente resulta dos processos de deflocações durante o processamento. Microestruturas originárias de partículas menores tendem a formar grãos pequenos, resultando no aumento das propriedades mecânicas.

As figuras 3a, 3b, 4a e 4b mostram as microestruturas dos compósitos. Todas as amostras apresentaram dispersão homogênea de partículas de zircônia na matriz da alumina. Provando a eficiência do processo de mistura.

A amostra que continha 5% de ZrO_2 apresentou maior porosidade quando comparada com as demais. Fato que provavelmente é fruto do não preenchimento dos espaços intersticiais dos grãos de alumina.

Nas composições com maior quantidade de zircônia, figuras 4a e 4b, é possível observar aglomerados sinterizados de partículas na microestrutura, evidenciando que o sistema pode estar supersaturado.

Figura 5 - Gráficos das dispersões de partículas dos compósitos (a) 95%, em massa de Al_2O_3 e 5 %, em massa de ZrO_2 e (b) 91,5%, em massa de Al_2O_3 e 8,5 %, em massa de ZrO_2 .

Figura 6 - Gráficos das dispersões de partículas dos compósitos (a) 88%, em massa de Al_2O_3 e 12 %, em massa de ZrO_2 . (b) 84,5%, em massa de Al_2O_3 e 15,5 %, em massa de ZrO_2 .

O efeito pinning foi indiretamente provado através da observação dos histogramas das composições. O aumento da quantidade de ZrO_2 na matriz resultou na concentração do tamanho dos grãos de alumina na região entre 0,5 e 1 μm .

4 CONCLUSÃO

O efeito pinning no sistema alumina-zircônia foi indiretamente provado através da análise do histograma de 4 amostras de diferentes composições, o que resultou em amostras com microestrutura de grãos menores com o aumento da massa de zircônia.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, órgão financiador. Às instituições de pesquisa INPE e ao AMR/DCTA aonde a prensagem isostática foi realizada. A Orientadora, Professora Doutora Maria do Carmo de Andrade Nono.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSIS, J. M. K. Estudo comparativo de compósitos alumina-zircônia tetragonal e de cerâmicas de alumina aditivada com nióbia para aplicações estruturais. 2007, Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Área de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos, Brasil. 2007.
- [2] AZOMaterials. Zirconia physical and mechanics properties comparison of different types of zirconia. 2016.
- [3] CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5. ed. São Paulo, Brasil: Editora LTC, 2002.
- [4] MINEIRO, S. L. Processamento e caracterização física e mecânica de cerâmicas de zircônia-ítria total e parcialmente nanoestruturadas. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Área de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Inovação – INPE. São José dos Campos. Brasil. 2007.
- [5] NONO, D.A. Análise comparativa dos processos de obtenção das cerâmicas da alumina α , da zircônia-3 ytzp e do compósito alumina α + 18,5 % zircônia-3 ytzp para aplicação em satélites como blindagem para impactos com detritos espaciais, Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Área de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos, Brasil. 2016.
- [6] PIERRI, J.; MAESTRELLI, S. C.; PALLONE, E. M. J. A.; TOMASI, R. Dispersão de nanopartículas de ZrO₂ visando produção de nanocompósitos de ZrO₂ em matriz de Al₂O₃. Revista Cerâmica. v. 51. 8-12, 2005.
- [7] PIERRI, J. Caracterização do nanocompósito de Al₂O₃ com inclusões nanométricas de ZrO₂ visando sua aplicação como reforço em próteses odontológicas livres de metal. 2008. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil, 2008.

Capítulo 8

Avaliação de desgaste de máscaras aplicadas a ferramentas de forjamento a quente

Mariana Lagnier Azevedo

Lirio Schaeffer

Luana de Lucca de Costa

Rafael Menezes Nunes

Resumo: Neste trabalho foi estudada a aplicação de uma máscara de aço antidesgaste 22Mn5B em forma de chapa aplicada em uma matriz de forjamento (recalque). Foram realizados ciclos experimentais de forjamento em corpos de prova de aço SAE 1045 com dimensões de 20 mm de diâmetro e 10 mm de altura. O processo de forjamento foi realizado em uma temperatura de 1000°C sendo os biletos aquecidos a 1200°C, utilizou-se lubrificante a base de grafite aplicado diretamente na máscara. Utilizou-se um martelo de queda de 35 kg e uma altura de 1 m de queda para realizar as deformações. A cada 50 ciclos de forjamento foi realizada uma avaliação superficial da máscara mostrando a evolução de desgaste e deformações provenientes do processo de forjamento. A partir dos resultados obtidos observou-se a baixa evolução de desgaste na máscara e a adesão de material na mesma.

Palavras chave: desgaste, matriz, máscaras, forjamento a quente, revestimento

1 INTRODUÇÃO

Devido à alta competição entre os produtores de forjamento, além do preço, a qualidade dos produtos forjados oferecidos é um fator cada vez mais levado em conta na escolha de um fornecedor. Principalmente, no forjamento, processo no qual os requisitos quanto à precisão e qualidade são altos. Os processos de forjamento pertencem a uma das técnicas de fabricação mais difíceis. Mesmo que esta tecnologia tenha sido bem dominada, a fabricação correta de forjados com formas complicadas tais como bielas, roscas sem fim, turbinas, alavancas, etc. que satisfazem as expectativas de alta qualidade dos clientes, requer muita experiência das forjarias [1,2].

O processo de fabricação do produto forjado apresenta ciclos repetidos, onde as ferramentas são submetidas a altas pressões. No forjamento a quente, devido ao contato da matriz com o material a ser forjado a uma elevada temperatura, a superfície da ferramenta sofre drástica mudança durante esses ciclos; as ferramentas aquecem bastante devido à deformação e à elevada temperatura do material e, em seguida, antes da conformação da nova peça, já sofre resfriamento [2]. Estas condições de trabalho severas do processo de forjamento a quente levam a uma falha prematura e a uma vida útil reduzida de matrizes de forjamento a quente [3]. A vida útil das matrizes é uma consideração importante do ponto de vista da redução de custos associada à substituição e manutenção de ferramentas, já que os custos com as matrizes representam de 10% a 15% do custo total do produto forjado [4].

No processo de forjamento, a vida útil das ferramentas é afetada por uma combinação complexa de altos esforços mecânicos e térmicos. Os esforços mecânicos são devidos aos repetitivos impactos sofridos pela matriz durante o forjamento. Já os esforços térmicos se devem a tensões geradas pelo contato cíclico da matriz e o material que está sendo forjado a uma temperatura elevada. As matrizes no forjamento a quente sofrem seguidos choques térmicos e mecânicos a cada golpe de forjamento, o que leva a danos superficiais na matriz e deixa a ferramenta sob tensão[5]. A alta carga térmica e o longo tempo de contato entre as matrizes e o material de deformação induzem a perda de dureza da matriz e aumentam a evolução do dano. Fenômenos importantes como o desgaste e o atrito ocorrem nas interfaces de contato entre a matriz e a peça no forjamento a quente. Deste modo, a força de atrito entre a matriz e a peça a ser forjada controla alguns fatores como a uniformidade da deformação plástica e a rugosidade da superfície do produto [6]. O desgaste da superfície da ferramenta também está associado a interações matriz-peça. Portanto, as altas pressões e temperaturas, material muito duro da matriz além de uma camada superficial extremamente dura e abrasiva formada por óxidos durante o processo, conduzem ao desgaste da matriz. A falha da matriz ocorre pela perda progressiva de material da superfície do sistema tribológico matriz-peça. Ao alterar a superfície da matriz, o desgaste pode causar danos graves, levando a falha da matriz e danificando o produto. Além disso, a transferência de óxidos e o desgaste abrasivo concomitante devido à presença de óxidos também é um mecanismo responsável pela danificação das matrizes de forjamento [7]. Deste modo, o método de falha que ocorre predominantemente nas matrizes de forjamento a quente é o desgaste da superfície de contato matriz-forjado, representando mais de 70% da falha total de matrizes de forjamento a quente [3,5]. O desgaste é causado por uma ligação local entre a peça de trabalho quente e a matriz, e um fenômeno de diminuição da dureza.

O material da matriz é especialmente sujeito a fadiga de baixo ciclo de alta temperatura e fadiga termomecânica. Deste modo, as matrizes utilizadas no forjamento geralmente são de aços série H, já que estes possuem propriedades capazes de suportar as altas cargas e temperaturas de forjamento. O aço ferramenta H13 tem a segunda maior percentagem de cromo em comparação com outras séries H além de quantidades médias de vanádio e molibdênio, tornando-o adequado para o forjamento a quente. O elevado teor de cromo faz com que este aço tenha uma resistência à alta temperatura e oxidação maior se comparado aos outros aços da série H. A presença de molibdênio aumenta a sua temperabilidade e a presença do vanádio aumenta a sua resistência além de facilitar sua fabricação e de melhorar o desempenho em serviço [8].

O desgaste de ferramentas e matrizes é um problema comum e a alternativa mais comumente utilizada é a realização de tratamentos térmicos seguida da aplicação de revestimentos, tais como: Nitretação, PVD, CVD, entre outros. Em matrizes aplicadas a processos de forjamento, estudos recentes estão mostrando uma nova alternativa em relação as técnicas convencionais. Esta alternativa consiste na aplicação de máscaras na matriz, estas máscaras consistem em uma chapa de aço de alta resistência aplicada diretamente a matriz. A grande vantagem da aplicação dessas máscaras é o baixo custo da máscara aliado a facilidade de manutenção e troca, mantendo a superfície da matriz livre de desgaste. O princípio desta técnica é a fabricação de uma matriz com uma cavidade para aplicação desta máscara, assim que um certo ciclo de peças é forjada na matriz e a máscara sofre algum tipo de dano rapidamente ela é substituída por

outra, tornando o processo de set-up rápido e de baixo custo. Além disso, pode-se utilizar materiais com menor custo na matriz.

Levando em consideração o desgaste das matrizes de forjamento a quente e os problemas causados por este desgaste, para o desenvolvimento deste trabalho foi fabricada uma máscara para proteger a interface matriz-forjado. Esta máscara foi feita para proteger a superfície da matriz e evitar o desgaste prematuro da mesma. Assim, o principal objetivo deste trabalho é analisar o desgaste sofrido pela máscara a cada 50 ciclos de forjamento a quente através de imagens obtidas em um estereomicroscópio além de imagens e dados de rugosidade obtidos em um perfilômetro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, foram utilizados corpos de prova utilizados cilíndricos, de aço 1045, um aço comumente utilizado nesta área. A faixa de composição básica de um aço 1045 de acordo com a ABNT é de 0,43 a 0,50% de carbono, 0,60 a 0,90% de manganês, máximo de 0,03% de fósforo e máximo de 0,05% de enxofre.

A matriz utilizada foi feita de AISI H13, um dos tipos de aço ferramenta, um material com elevado nível de qualidade resistente muito utilizado na fabricação de matrizes de forjamento.

A máscara protetora da matriz foi feita de 22Mn5B, um aço baixa liga que possui elevada resistência ao desgaste.

Os corpos de prova foram aquecidos a 1200°C, em um forno da marca Sanchis, e colocados um a um sobre a máscara protetora para que o martelo de queda livre fosse solto sobre eles. O martelo utilizado tem uma altura máxima de um metro de altura e o peso do martelo é de 35 kg. Um esquema do martelo com suas medidas está explicitado na Figura 1.

Figura 1: Dimensões do martelo.

Fonte: Autor

A Figura 2 mostra um esquema da matriz, da máscara protetora e dos corpos de prova. A matriz tem o diâmetro de 100 milímetros com um rebaixo de 1,3 milímetros, a espessura da máscara protetora, para que a máscara encaixe na matriz e evite que ela saia do lugar. A máscara protetora da matriz tem 90 milímetros de diâmetro e os corpos de prova tem 10 milímetros de altura e 25 de diâmetro.

Figura 2: Dimensões da matriz, máscara protetora e corpos de prova.

Fonte: Autor

A montagem da matriz no martelo para o procedimento experimental pode ser vista na Figura 3. A matriz foi presa no centro da base do martelo, onde o peso do mesmo é solto para recriar os ciclos de forjamento.

Figura 3: Esquema matriz e martelo.

Fonte: Autor

Foram realizadas análises utilizando um perfilômetro Bruker com imagens em 2D, onde são mostrados picos com altura máxima de 50 μm e vales com altura máxima de 35 μm . As imagens obtidas pelo perfilômetro foram divididas em dois grupos: eixo x e eixo y, ambas passando pelo centro da máscara. O centro da máscara marca o zero, e, a partir desse centro, foram feitas imagens até 10 milímetros de distância no eixo x (horizontal) e no eixo y (vertical). Além disso, com o perfilômetro, ainda foi possível fazer o perfil de rugosidade da mesma área onde foram obtidas as imagens. Foram ainda feitas imagens macroscópicas com um estereomicroscópio Leica EZ4 com LED e câmeras em HD com o aumento de 10 vezes afim de mostrar a aparência da máscara protetora da matriz após os ciclos de forjamento. Ambas as

análises, com o perfilômetro e com o estereomicroscópio, foram feitas após 50, 100, 150 e 200 forjamentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PERFILOMETRIA

As imagens obtidas pelo perfilômetro mostram os perfis de rugosidade da máscara protetora da matriz. As imagens são analisadas através das cores que podem representar picos ou vales. Os tons de azul mais escuro até azul mais claro, representam vales com valores de até $35\ \mu\text{m}$. Os tons de verde e amarelo mostram que o relevo teve poucas alterações, sendo protuberâncias com valores próximos a zero μm . Já as partes em tons avermelhados indicam a presença de picos com valores máximos de $50\ \mu\text{m}$.

Na Figura 4 observa-se as imagens obtidas no eixo x para 50, 100, 150 e 200 ciclos de forjamento. Na Figura 4(a) pode-se observar o perfil de rugosidade da máscara após 50 forjamentos. Após 50 forjamentos a máscara protetora possui alguns picos mais relevantes, porém a maior parte, é constituída de relevos de alturas parecidas, perto do nível inicial da peça. Além disso pode-se observar grande vale. Já com 100 forjamentos, Figura 4(b), a quantidade de picos diminuiu, e os vales presentes na imagem de 50 forjamentos não estão tão evidentes aparecendo mais relevos da altura inicial da peça. A Figura 4(c) apresenta as imagens após 150 forjamentos. Neste caso observa-se que as partes anteriormente sem expressiva alteração em seu relevo agora apresentam picos menores, além disso, as áreas com relevo próximo a zero aumentaram. Com 200 forjamentos pode-se observar na Figura 4(d) uma área com um maior número de picos, porém o número de áreas com vales cresceu em detrimento das áreas com relevo próximo a zero presentes com 150 forjamentos, mostrando uma homogeneidade na rugosidade da peça.

Na Figura 5 pode-se observar as imagens obtidas pelo perfilômetro no eixo y após 50, 100, 150 e 200 forjamentos. Após 50 forjamentos na Figura 5(a), as imagens sugerem a presença de picos, além da presença de regiões com a presença de vales. Mesmo com a presença desses picos e vales, a maior parte da peça é constituída por regiões sem grandes modificações no relevo. Porém após 100 forjamentos mostrado na Figura 5(b), pode-se observar que a quantidade de picos diminuiu, além do aumento número de vales, indicando que houve um desgaste abrasivo em algumas regiões da máscara protetora. Apesar disso, a maior parte da máscara ainda é constituída de relevos semelhantes, próximos a zero.

Figura 4: Imagens do eixo x obtidas na perfilometria. (a) 50 forjamentos. (b) 100 forjamentos. (c) 150 forjamentos. (d) 200 forjamentos.

Fonte: Autor.

Figura 5: Imagens do eixo x obtidas na perfilometria. (a) 50 forjamentos. (b) 100 forjamentos. (c) 150 forjamentos. (d) 200 forjamentos.

Fonte: Autor.

Depois de 150 forjamentos, Figura 5(c), surgiram regiões com maior número de picos em detrimento das regiões com vales existentes anteriormente. Já com 200 forjamentos, Figura 5(d), existem mais regiões com relevo próximo a zero, além da diminuição do número de picos existentes com 150 forjamentos.

Além das imagens em 2D, também foram obtidas as medidas de rugosidade Ra das mesmas regiões no eixo x e no eixo y com 50, 100, 150 e 200 forjamentos. O gráfico mostra como ficou o perfil de rugosidade de acordo com a posição no eixo x. Os primeiros 50 forjamentos apresentam picos com maiores valores no entorno de $5,7 \mu\text{m}$ e vales com valores perto de $2 \mu\text{m}$. Os seguintes 100 forjamentos mostram em seu perfil de rugosidade valores de Ra elevados no eixo x até a posição 0, ou seja, no meio da máscara protetora, e depois o perfil de rugosidade tende a estabilizar em valores próximos de $4 \mu\text{m}$. A partir de 150 forjamentos, assim como nos primeiros ciclos de forjamento, o perfil de rugosidade começa com valores altos, porém, perto do meio da máscara protetora os valores de Ra diminuem drasticamente em relação a medição anterior. Além disso, o perfil de rugosidade neste caso acaba com valores maiores do que nos outros ciclos de forjamento nas últimas posições, ou seja, mais perto das bordas da máscara protetora. Para os 200 forjamentos o perfil de rugosidade, não possui muitos picos como nos outros casos e tende a ficar em uma faixa entre $2,5 \mu\text{m}$ e $5,5 \mu\text{m}$.

Gráfico1: Perfil de Rugosidade eixo x

Fonte: Autor

O Gráfico 2 mostra o perfil de rugosidade Ra do eixo y. Com 50 forjamentos, em ambas as extremidades da máscara protetora, nas primeiras e últimas posições, os valores de rugosidade Ra são um dos mais baixos e o segundo mais alto respectivamente. Porém, perto do meio da máscara, são encontrados os menores valores de Ra. Com 100 compressões, o perfil de rugosidade se mantém com valores altos por todo o eixo y, tendo vários picos e vales. O perfil de rugosidade dos 150 forjamentos, assim como no perfil das 100 compressões, existem vários picos e vales durante o eixo analisado, porém possui seu ponto mais baixo no meio da máscara e seu ponto mais alto nos extremos na máscara. Já nas 200 compressões, existem dois picos que se sobressaem, o primeiro perto da região central da máscara e o outro perto da extremidade da máscara, entre as posições 4 e 6.

Gráfico 2: Perfil de Rugosidade eixo y

Fonte: Autor

3.2 ESTEREOMICROSCÓPIO

A cada 50 forjamentos também foram obtidas imagens com o estereomicroscópio assim como mostra a Figura 6. Nos primeiros 50 forjamentos, Figura 6(a), pode-se observar que os corpos de prova ficaram bem marcados na máscara protetora. Após os 100 ciclos de forjamento, mostrado na Figura 6(b), ainda consegue-se ver a marca dos corpos de prova na máscara, porém menos evidente. A Figura 6(c) apresenta a máscara com 150 forjamentos. Neste caso, consegue-se observar na máscara as marcas provocadas pelos corpos de prova, sendo que na parte onde foram forjados os corpos de prova está mais clara e sem oxidação. Após os 200 forjamentos, Figura 6(d), a marca dos corpos de prova é bem visível, mais clara e brilhante e sem oxidações.

Figura 6: Máscara Protetora. (a) 50 forjamentos. (b) 100 forjamentos. (c) 150 forjamentos. (d) 200 forjamentos.

Fonte: Autor.

CONCLUSÕES

Pode-se concluir neste trabalho que apesar de ter sofrido 200 compressões a quente, a máscara protetora apresentou um desgaste baixo e, em alguns lugares, sofreu até aderência de material.

Depois dos primeiros 100 forjamentos, a rugosidade média da máscara apresentou valores parecidos principalmente no meio da máscara protetora, onde ocorreu o maior número de forjamentos.

Além disso, a máscara também sofreu muita oxidação, que também é um tipo de desgaste.

Apesar de ter apresentado um desgaste baixo, para próximos trabalhos seria recomendável que os forjamentos fossem mais centralizados na peça e ocorressem em apenas um lugar para a obtenção de melhores valores de rugosidade e análise do desgaste.

REFERÊNCIAS

- [1] Ahn, D. G., Lee, H. J., Cho, J. R., & Guk, D. S. (2016). Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 257–260. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.013>
- [2] Barrau, O., Boher, C., Gras, R., & Rezai-Aria, F. (2003). Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. *Wear*, 255(7–12), 1444–1454. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00280-1)
- [3] Lee, H. C., Kim, B. M., & Kim, K. H. (2003). Estimation of die service life in hot forging, considering lubricants and surface treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(7), 1011–1022. <https://doi.org/10.1243/09544050360686860>

- [4] Choi, C., Groseclose, A., & Altan, T. (2012). Estimation of plastic deformation and abrasive wear in warm forging dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(8), 1742–1752. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.023>
- [5] Hawryluk, M., & Jakubik, J. (2016). Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes. *Engineering Failure Analysis*, 59, 396–409. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.008>
- [6] Marashi, J., Yakushina, E., Xirouchakis, P., Zante, R., & Foster, J. (2017). An evaluation of H13 tool steel deformation in hot forging conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 246, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.026>
- [7] Kchaou, M., Elleuch, R., Desplanques, Y., Boidin, X., & Degallaix, G. (2010). Failure mechanisms of H13 die on relation to the forging process - A case study of brass gas valves. *Engineering Failure Analysis*, 17(2), 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.08.015>
- [8] Luo, S., Zhu, D., Hua, L., Qian, D., & Yan, S. (2017). Numerical analysis of die wear characteristics in hot forging of titanium alloy turbine blade. *International Journal of Mechanical Sciences*, 123(October 2016), 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.013>
- [9] COSTA, L.L. Estudo da aplicabilidade de chapas metálicas de alta resistência como “die mask” em matrizes de forjamento a quente. 2018. 53 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018

Capítulo 9

Aplicação do Método de Taguchi para avaliação dos parâmetros de caracterização microestrutural com reagente Nital em um aço Dual Phase

Antonio dos Reis de Faria Neto

Cristina Sayuri Fukugauchi

Marcelo dos Santos Pereira

Resumo: O desempenho dos aços Dual Phase (DP) é estreitamente relacionado com seus microconstituintes. Assim, a caracterização e controle efetivo da microestrutura desses materiais são cruciais, sendo que os processos de ataques químicos são essenciais para que isso ocorra. Neste contexto, com o intuito de discutir como os fatores envolvidos nos processos de ataques químicos com o reagente de Nital influenciam na caracterização metalográfica do aço DP este estudo foi realizado. A utilização do Método de Taguchi possibilitou a produção de resultados com suporte estatístico, confiabilidade e otimização. Para a realização dos experimentos foi considerado um arranjo ortogonal L8 e três interações, para tanto, foram estudados os seguintes fatores: concentração da solução de reagente, tempo e modo de ataque, e modo de limpeza. A fração volumétrica das fases presentes foi utilizada como variável resposta, e para análise dos resultados, aplicou-se a técnica de análise da variância (ANOVA) utilizando a estatística F. Com os resultados foi possível concluir que os fatores que têm significância no processo de ataque do aço estudado são: Concentração da solução de nital, modo de ataque, tempo de ataque, modo de limpeza e interação entre modo e tempo de ataque; O fator modo de limpeza quando ajustado no nível 2, diferente do esperado, se mostrou relevante. Além de possibilitar identificar os fatores e respectivos níveis que mais possuem influência sobre a variável de resposta, os resultados obtidos permitem o ajuste dos níveis dos fatores de forma a se obter o resultado esperado: imagens que caracterizem o material analisado.

Palavras chaves: Aço Dual Phase, Método de Taguchi, Caracterização Microestrutural.

1. INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento tecnológico na fabricação de veículos, e de forma mais específica, na evolução dos materiais aplicados nesse processo, teve um momento marcante quando, durante a década de 1970, segundo Marra (2008), a crise do petróleo e a globalização da economia pressionaram as siderúrgicas a desenvolverem novas tecnologias. O principal objetivo das siderúrgicas, nesse período, foi de fornecer as montadoras de automóveis um material avançado, com alta resistência, para que fosse atingido em seu produto final o aumento da integridade estrutural e da resistência ao choque com redução do peso e do custo (CASTRO, 2010). A indústria automobilística, então, adotou medidas como: redução do tamanho dos veículos, substituição de materiais tradicionalmente utilizados por alumínio e plástico e a substituição dos aços carbono comuns por aços de maior resistência garantindo o aumento da integridade estrutural, aumento da resistência ao choque, com um menor custo para o produto final (KISHIDA, 2000).

Dentre estes aços de maior resistência, o Aço Bifásico (DP Steel) foi proposto no final da década de 70 e possui a microestrutura formada essencialmente de ferrita e martensita, mas sabe-se que em função da composição química e dos tipos de tratamentos térmicos, a microestrutura final poderá ser mais complexa, constituída de ferrita, martensita, bainita, austenita retida e vários tipos de agregados de ferrita e carbonetos. Portanto, as propriedades mecânicas do Aço DP dependem das características das fases presentes, quantidade, distribuição e da maneira como elas se interagem (SUN; PUNGH, 2002; SILVA, 2016). Possuem como características principais: alto coeficiente de encruamento; escoamento contínuo (ausência de patamar de escoamento); limite de resistência médio de 380 MPa; limite de resistência à tração médio de 655 MPa e alongamento total superior a 27% (GORN, 2009; SHAW; ZUIDEMA, 2001).

Estas propriedades podem ser entendidas como uma resposta dada pelo material a uma solicitação e é dependente de sua microestrutura. Desta forma, caracterizar e compreender a estrutura do material é um processo importante para o entendimento de seu desempenho, sendo que os processos metalográficos são essenciais para que isso ocorra. O problema da reprodutibilidade no processo de ataque químico para se revelar a estrutura de um aço deve-se ao grande número de variáveis existentes (KEHL; METLAY, 1953; GREENE, RUDAW; LEE, 1966; KILPATRICK; BENSCOTER; MARDER, 1971; BEHARA; SHPIGLER, 1977; LEPERA, 1980), tais como o material a ser caracterizado, o modo de ataque, modo de secagem, tempo de exposição da amostra ao reagente, realização ou não de pré-ataque, concentração dos reagentes, entre outros fatores, que afetam os resultados deste processo tornando necessária a análise dos efeitos dos mesmos na caracterização metalográfica do material em estudo (BRITZ; HEGETSCHWEILER; MÜCKLICH, 2014).

A aplicação de técnicas de Projeto de Experimentos (Design of Experiments – DOE) pode otimizar o estudo em situações que se tenha um grande número de variáveis (fatores) envolvidos, além de conseguir diminuir o número de experimentos a serem realizados. O Método de Taguchi é uma das técnicas de DOE que vem sendo amplamente empregado em diversos campos industriais e acadêmicos fornecendo uma abordagem simples, eficiente e sistemática para otimizar os projetos em relação ao desempenho, qualidade e custo (MOGANAPRIYAA et al, 2018). Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar, com o emprego do Método de Taguchi, o processo de ataque químico utilizando o reagente Nital, a fim de investigar a influência de diversas variáveis do processo, bem como das interações entre as mesmas, na qualidade da imagem obtida após ataque químico e caracterização de um aço DP600.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados o material utilizado juntamente com sua composição química e propriedades mecânicas, a seleção do arranjo ortogonal e arranjo linear utilizados, preparação das amostras metalográficas e as análises estatísticas utilizadas neste trabalho.

2.1. MATERIAL

Neste trabalho foi utilizado o aço com estrutura multiconstituída DP600 destinado à indústria automotiva. A composição química deste material está representada na Tabela 1 e suas propriedades mecânicas na Tabela 2.

Tabela 1 – Composição química do Aço DP600.

Elemento de Liga	DP600
Carbono (C)	0,133
Silício (Si)	0,370
Manganês (Mn)	1,410
Fósforo (P)	0,016
Enxofre (S)	0,003
Cromo (Cr)	0,194
Níquel (Ni)	0,001
Molibdênio (Mo)	0,102
Alumínio (Al)	0,037
Cobre (Cu)	0,007
Titânio (Ti)	0,012
Vanádio (V)	0,002
Nióbio (Nb)	0,003
Estanho (Sn)	0
Boro (B)	0,004

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do Aço DP600.

Material	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Coefficiente de Anisotropia	Coefficiente de Encruamento
DP 600 T	623,8	408,4	24,41	1,21	0,15
DP 600 L	621,6	400,6	25,3	1,19	0,16
DP 600 45°	628,7	409,7	22,01	1,35	0,15

2.2. ARRANJO ORTOGONAL E GRÁFICO LINEAR

Para seleção dos fatores e das variáveis respostas do processo de ataque químico utilizado reagente Nital 2%, foi realizado um planejamento de experimentos. Os fatores e seus respectivos níveis foram escolhidos baseando-se em referências bibliográficas e experimentos anteriores e se encontram na Tabela 3.

A determinação dos valores relativos aos níveis do fator "tempo de ataque" teve como fundamento pesquisas anteriores, referências bibliográficas, e principalmente experimentos prévios. Não foram consideradas as interações do fator modo de limpeza com os demais fatores ao se planejar os experimentos, pois, acreditava-se que este fator não seria significativo para a variável de resposta devido ao fato de não se ter encontrado menção à influência deste fator nas referências bibliográficas pesquisadas.

Tabela 3 - Fatores e níveis do Arranjo Ortogonal.

Fatores	Níveis	
	(-) ou (1)	(+) ou (2)
1: Concentração da solução de Nital	2%	3%
2: Modo de ataque	imersão	esfregamento
4: Tempo de ataque	11	15
7: Modo de limpeza, após ataque químico	modo convencional	solução de 1% de bicarbonato de sódio
Interações		
3: Concentração da solução de Nital x modo de ataque		
5: Concentração da solução de Nital x tempo de ataque		
6: Modo de ataque x tempo de ataque		

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Com a seleção das variáveis a serem estudadas foi possível escolher o arranjo ortogonal a ser utilizado. Neste trabalho, o arranjo ortogonal padrão denominado L8 foi selecionado com base no número de fatores, seus níveis e as interações entre os mesmos. Gráficos lineares correspondentes a esses arranjos ortogonais também foram selecionados para caracterização das interações a serem analisadas e são mostrados na Figura 1.

Figura 1 – Arranjo ortogonal L8

Fonte: Taguchi; Chowdhury; Wu (2005)

Desta forma, foram estabelecidos os arranjos ortogonais para a realização dos experimentos utilizando o reagente Nital, Tabela 4.

Tabela 4 - Arranjo ortogonal para a realização do experimento.

Exp.	Concentração da solução de Nital (%)	Modo de ataque	Tempo de ataque	Modo de limpeza
1	2%	imersão	11	modo convencional
2	2%	imersão	15	água com bicarbonato de sódio
3	2%	esfregamento	11	água com bicarbonato de sódio
4	2%	esfregamento	15	modo convencional
5	3%	imersão	11	água com bicarbonato de sódio
6	3%	imersão	15	modo convencional
7	3%	esfregamento	11	modo convencional
8	3%	esfregamento	15	água com bicarbonato de sódio

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Ressalta-se que os experimentos foram conduzidos de forma aleatória, de modo a reduzir os erros sistemáticos. A fim de tornar possível a estimativa do erro experimental e diminuir a margem de erros dos ensaios os experimentos foram realizados em triplicata.

2.3. PREPARAÇÃO METALGRÁFICA E MICROSCOPIA ÓPTICA

As técnicas utilizadas para a preparação das amostras metalográficas seguiram os processos normatizados pela ASTM E 3-11 (2017). Os ataques foram realizados de acordo com a norma ASTM E407-07 (2015)e1.

Após a realização de cada experimento, as amostras foram fotografadas. Foram capturadas 20 imagens para os ataques com o reagente Nital de forma aleatória ao longo de toda a superfície das amostras.

A obtenção das imagens metalográficas foi realizada no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMAT) do Departamento de Materiais e Tecnologia - FEG/UNESP. As imagens foram fotografadas em campo claro, utilizando um microscópio óptico Nikon modelo Epiphot 200, acoplado a um PC e a uma câmera digital AXIO CAM 1CC3 ZEISS, usando-se o software Axio Visio – ZEISS.

2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICAS REALIZADAS

Foi utilizado a técnica de análise da variância (ANOVA) para distinguir a influência relativa dos fatores na variação dos resultados utilizando a estatística F (razão entre a variância do fator e a variância do erro) para medir a significância do fator analisado em relação à variância de todos os fatores incluídos no termo de erro. Os valores críticos de F foram retirados das tabelas apresentadas por Montgomery (2012). Utilizou-se o nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados relativos aos experimentos com o aço DP600 também foram analisados e discutidos. Os cálculos dos efeitos médios dos fatores foram efetuados e os resultados encontram-se na Tabela 5, além de terem sido plotados e apresentados na Figura 2.

Tabela 5 – Efeito médio dos fatores.

Concentração nital		Modo de ataque		Tempo de ataque		Modo de limpeza	
2%	3%	Imersão	esfregamento	11s	15s	Convencional	Solução NaHCO ₃ 1%
40,2%	44,1%	37,4%	46,9%	37,5%	46,8%	39,3%	45,0%

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Observa-se, principalmente pelo gráfico da Figura 2, que os fatores modo e tempo de ataque possuem grande importância na variável de resposta (fração volumétrica). Fato notado pelo acentuado aumento da resposta a cada vez que um destes fatores varia e que pode ser conferido nas Figuras 3, e 4.

Figura 2 – Gráfico dos efeitos e interações dos fatores sobre a média das medianas da fração volumétrica.

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Os experimentos 1 e 3, 6 e 8 diferem pelo modo de ataque e modo de limpeza a que as amostras foram submetidas. Não é possível afirmar que o modo de ataque foi o único fator responsável pelo aumento da fração volumétrica que ocorreu quando se compara as Figuras 3a e 3b, e 4a e 4b. Sabe-se, no entanto, que o aumento da fração volumétrica (variável resposta) em razão do modo de ataque é maior do que deve ocorrer devido ao modo de limpeza, de acordo com a Tabela 5.

A importância do fator tempo de ataque pode ser comprovada ao se comparar as Figuras 3a e 5a. Como no caso descrito anteriormente, não é possível separar o quanto o fator modo de limpeza influenciou no resultado, mas, é visível a diferença de fração volumétrica entre as duas imagens, resultado da combinação de ambos os fatores, do mesmo modo que o resultado apresentado nas Figuras 3b e 5b.

Figura 3 – Tempo de ataque 11s. Reagente: nital 2%. a) Modo de ataque: imersão (Experimento 1 - fração volumétrica: 29,1%). b) Modo de ataque: esfregamento (Experimento 3- fração volumétrica: 40,0 %)

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Figura 4 – Tempo de ataque: 15s. Reagente: nital 3%. a) Modo de ataque: imersão (Experimento 6 - fração volumétrica: 42,3%). b) Modo de ataque: esfregamento (Experimento 8 - fração volumétrica: 56,2 %)

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Figura 5 – Tempo de ataque 15s. Reagente: nital 2%. a) Modo de ataque: imersão (Experimento 2 - fração volumétrica: 40,4%). b) Modo de ataque: esfregamento (Experimento 4 - fração volumétrica: 50,8%)

Fonte: Próprio Autor, (2019).

A interação entre estes fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração do reagente de 2%) foi analisada e o resultado plotado no gráfico da Figura 6.

Figura 6 – Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital 2%) sobre a média da fração volumétrica.

Fonte: Próprio Autor, (2019).

A alteração da concentração da solução de nital também se mostrou determinante para o aumento da fração volumétrica, quando a amostra foi atacada com o reagente nital 2% por 15s, a fração volumétrica foi de 40,4%, mas, quando a concentração foi de 3%, a variável de resposta foi de 42,3%.

Tendo sido comprovada a influência de alguns fatores na variável de resposta do processo, verificando assim, os resultados obtidos até o momento, o melhor ajuste para o processo, com o intuito de se maximizar a intensidade/grau de ataque será:

- Concentração da solução de nital no nível 2 (3%);
- Modo de ataque no nível 2 (esfregamento);
- Tempo de ataque no nível 2 (tempo maior);
- Modo de limpeza no nível 2 (solução de bicarbonato de sódio 1%).

Este ajuste (12 22 42 72) está contemplado na matriz de experimentos, sob a denominação Experimento 8 e, de fato, apresenta a maior fração volumétrica do arranjo ortogonal ($\bar{Y} = 58,1\%$), Figura 7, ou seja, ao realizar o ataque utilizando estes parâmetros nos níveis citados obteve-se a maior estimativa de fração volumétrica da fase escura dentre os experimentos realizados.

A partir dos resultados das frações volumétricas de cada experimento foram efetuados os cálculos da análise da variância (ANOVA) com o intuito de identificar quais são os fatores que possuem significância comprovada para o processo, dessa forma, tornando possível o controle dos mesmos de maneira a obter os resultados esperados dos ataques químicos realizados. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 6.

Figura 7 – Tempo de ataque 15s. Reagente: nital 3% - Modo de ataque: esfregamento (Experimento 8- fração volumétrica: 62,7 %)

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Tabela 6 – Resultados da ANOVA (em relação à média).

Fatores	SQ	GL	MQ	F	p	Nível de confiança
Concentração nital	94,4384	1	94,4384	10,01933	0,005999	99,40
Modo de ataque	535,1537	1	535,1537	56,77647	0,000001	100,00
Interação: concentração nital x modo ataque	0,0749	1	0,0749	0,00795	0,930062	6,99
Tempo ataque	523,4042	1	523,4042	55,52993	0,000001	100,00
Interação: concentração nital x tempo de ataque	2,2792	1	2,2792	0,24181	0,629581	37,04
Interação: modo de ataque x tempo de ataque	92,4102	1	92,4102	9,80415	0,006445	99,36
Modo de limpeza	196,0188	1	196,0188	20,79637	0,000321	99,97
Erro	150,8100	16	9,4256			

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Os fatores concentração da solução de nital, modo de ataque, tempo de ataque, modo de limpeza e a interação entre o modo de ataque e o tempo de ataque impactam a variável de resposta do processo, de acordo com o critério estabelecido para se determinar a significância ou não dos fatores no processo ($p\text{-valor} \leq 0,05$). Esta afirmação encontra-se em acordo com os dados apresentados na Tabela 5 e Figura 2.

Percebe-se que além dos fatores, o efeito da interação entre o modo e tempo de ataque mostrou ter impacto na fração volumétrica da fase escura do material. O nível de confiança de que este fator tenha relevância para o processo do ataque do aço DP600 foi de 99,4%. Por este motivo, traçou-se o gráfico ilustrado na Figura 8 para melhor entender como interagem estes fatores.

Os experimentos mostrados nas Figuras 3 e 5 ilustram a situação descrita na Figura 8. Quando uma amostra de aço DP600 é atacada com o reagente nital 2% por 11s, por imersão, a fração volumétrica foi de 29,1%. Entretanto, quando a amostra do material foi atacada por esfregamento, a fração passou a 40,0%. Modificando o tempo de ataque, para 15s, Figura 5, nota-se que a fração volumétrica do material aumenta de maneira mais acentuada quando o ataque ocorre por esfregamento, visto que a velocidade de reação quando o ataque é realizado por este método deve ser maior.

Figura 8 – Gráfico Interação entre fatores: tempo de ataque x modo de ataque

Fonte: Próprio Autor, (2019).

As demais combinações entre fatores não apresentaram resultados relevantes. No entanto, o estudo das mesmas foi realizado, pois, apesar de não terem sido considerados significantes, ambos ocasionam aumento na variável de resposta do processo, o que contribui para o melhor entendimento do mesmo. Os gráficos destas interações podem ser observados nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Concentração da solução de nital x tempo de ataque

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Fato interessante se observa na curva da Figura 9, quando o ataque é realizado por 15s, com o reagente nital tanto na concentração de 2% quanto de 3%, a fração volumétrica das amostras possui pouca variação, sendo quase constante. Este comportamento pode ser melhor visualizado pela análise da Figura 10.

Figura 10 – Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital) sobre a média da fração volumétrica.

Fonte: Próprio Autor, (2019).

As imagens da Figura 11 ilustram duas amostras atacadas nas condições mencionadas. Nota-se que mesmo que a concentração de nital tenha aumentado as frações volumétricas praticamente não se alteraram. O que se observou foi a qualidade das imagens obtidas. Ambas as Figuras não apresentam todos os grãos de sua microestrutura definidos, sendo possível verificar alguns contornos sombreados nas mesmas, porém a Figura 11a apresentou um delineamento menor das fases microconstituintes, o que

dificulta a visualização da microestrutura característica do aço bifásico. Apesar de ambas as amostras possuírem frações volumétricas semelhantes, isso não indica que o mesmo número de grãos foram delineados, ou que as mesmas fases foram atacadas.

Figura 11 – Modo de ataque: imersão. Tempo: 15s. a) reagente: nital 2%
(Experimento 2 - fração volumétrica: 42,6%). b) reagente: nital 3%
(Experimento 6 - fração volumétrica: 42,3%)

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Pela análise da Figura 12 não se observa qualquer particularidade na relação entre os fatores concentração da solução de nital e modo de ataque. Ou seja, de uma maneira geral, ao se alterar a concentração da solução de nital de 2% para 3%, a porcentagem de fração volumétrica aumenta, o mesmo ocorre se o modo de ataque for alterado. Desse modo, pode-se afirmar que não há interação entre estes dois fatores.

Figura 12 – Concentração da solução de nital x modo de ataque.

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Ao se realizar o ataque químico do aço DP600 com o reagente nital 3% por 11s, a variável de resposta foi similar quando se realizou o ataque tanto por imersão quanto por esfregamento, conforme mostra a Figura 13.

Figura 12 – Efeitos e interações dos fatores (modo de ataque, tempo de ataque e concentração da solução de nital 3%) sobre a média da fração volumétrica.

Fonte: Próprio Autor, (2019).

Note que tal comportamento não ocorreu quando a concentração de 2% foi utilizada. A Figura 13 mostra amostras atacadas com o reagente nital 3% por 11s.

Figura 13 – Tempo de ataque 11s. Reagente: nital 3%. a) modo de ataque: imersão (Experimento 5 - fração volumétrica: 40,0%). b) modo de ataque: esfregamento (Experimento 7 - fração volumétrica: 40,0%)

Fonte: Próprio Autor, (2019).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ANALISADO

Para a caracterização do aço DP600, três experimentos realizados não apresentaram bons resultados quanto à identificação de fases presentes. O experimento 1 não foi capaz de delinear o constituinte da fase escura (martensita, e talvez, austenita retida), como se verifica na Figura 14. E os parâmetros utilizados nos experimentos 4 e 8 ocasionaram um ataque excessivo na amostra.

4. CONCLUSÃO

O processo de ataque químico corrosivo utilizando o reagente nital foi analisado visando comprovar estatisticamente resultados que são amplamente conhecidos, ou seja, quais são os fatores e possíveis interações entre os mesmos que maximizam o grau de ataque do material em estudo, a fim de melhor administrá-los durante o processo. Para tanto, a variável de resposta escolhida foi a fração volumétrica da fase escura (martensita+bainita) presente no material após realização do ataque químico. Desse modo, concluiu-se que:

Os fatores que têm significância no processo (probabilidade igual ou superior a 95% de impactar a variável de resposta) de ataque do aço estudado, quando é considerada a maximização do grau de ataque são: Concentração da solução de nital, modo de ataque, tempo de ataque, modo de limpeza (água ou solução de água com bicarbonato de sódio) e interação entre modo e tempo de ataque; O fator modo de limpeza quando ajustado no nível 2 (solução de água com bicarbonato de sódio), diferente do esperado, se mostrou relevante.

Além de possibilitar identificar os fatores e respectivos níveis que mais possuem influência sobre a variável de resposta, os resultados obtidos permitem o ajuste dos níveis dos fatores de forma a se obter o resultado esperado, como por exemplo: imagens que caracterizem o material analisado.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a UNESP, o IFSP e a CAPES pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- [1] American Society for Testing and Materials. ASTM E 3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2017.
- [2] American Society for Testing and Materials. ASTM E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 2015.
- [3] BERaha, E.; SHPIGLER, B.; Color metallography. 1st ed. Ohio: American Society for Metals, 160p. 1977.
- [4] BRITZ, D.; HEGETSCHWEILER, A.; MÜCKLICH, F. Opening the door to fundamental understanding of structure and color metallography - a correlative microscopy study on steel. Microscopy and Microanalysis, v.20 (Suppl 3), p. 834-835, 2014.
- [5] CAMPOSECO-NEGRETE, C. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. Journal of Cleaner Production, n.53, p.195-203, 2013.
- [6] CASTRO, I. Aços Avançados de Alta Resistência: Uma Experiência na Usiminas – 47º Seminário de Laminacao, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, Brasil, 2010.
- [7] GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. In: CONGRESSO DE CORTE E CONFORMAÇÃO DE METAIS, 5, 2009, São Paulo. Anais... São Paulo: Aranda Eventos, 2009. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/publ.html#dp>>. Acesso em: 17 fev. 2019.
- [8] GREENE, N. D.; RUDAW, P. S.; LEE, L. Principles of metallographic etching. Corrosion Science, v.6, p.371-379, 1966.
- [9] KAMYABI-GOL, A.; SHEIKH-AMIRI, M. Spheroidizing kinetics and optimization of heat treatment parameters in CK60 steel using Taguchi robust design. Journal of Iron and Steel Research, International. v.17, n.4, p. 45-52. 2010.
- [10] KECHAGIAS, J.; PETROPOULOS, G.; VAXEVANIDIS, N. Application of Taguchi design for quality characterization of abrasive water jet machining TRIP sheet steels. Int J Adv Manuf Technol, n. 62, p. 635-643. 2012.
- [11] KEHL, G. L.; METLAY, M. The mechanism of metallographic etching I. The reaction potentials of a two-phase brass in various etching reagents. Journal of the Electrochemical Society, v. 101, n. 3, p. 124-127, 1953.
- [12] KILPATRICK, J. R.; BENSCOTER, A. O.; MARDER, A. R. Tint etching improves resolution and contrast of microstructures. Metal Progress, p. 79-82, 1971.
- [13] KIM, S. J. et al. Development of a dual phase steel using orthogonal design method. Materials and Design, v. 30, p. 1251-1257, 2009.
- [14] KISHIDA, K. High strength steel sheets for light weight vehicle. Nippon Steel Technical Report, n.81, p. 12-16, janeiro de 2000.

- [15] LEPERA, F. S. Improved etching technique to emphasize martensite and bainite in high-strength dual-phase steel. *Journal of Metals*, p. 38-39, 1980.
- [16] MALLAIAH, G. et al. Influence of grain refining elements on mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel weldments - Taguchi approach. *Materials and Design*, n.36, p.443-450, 2012.
- [17] MARRA, K. M. Aços Dual Phase da Usiminas: Características e Potencial de Aplicação em Veículos Automotores. In: Congresso Anual da ABM, 63. 2, 2008, Disponível em: <www.abmbrasil.com.br/.../20080728_2valoragregado_kleinermarra.pps> Acesso em 19 abril de 2017.
- [18] MASON, P. W.; PREVÉY, P. S. Iterative Taguchi analysis: optimizing the austenite content and hardness in 52100 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 10, n. 1, p. 14-21, Feb. 2001.
- [19] MOGANAPRIYAA, C. et al. Influence of Coating Material and Cutting Parameters on Surface Roughness and Material Removal Rate in Turning Process Using Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 8532-8538, 2018.
- [20] MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 8.ed. New York, John Wiley & Sons, 730p. 2012.
- [21] ROY, R. K. Design of experiments using the Taguchi approach. 1.ed. New York, John Wiley & Sons, 538p. 2001.
- [22] SHAW, J. R.; ZUIDEMA, B. K. New High strength steels help automakers reach future goals for safety, affordability, fuel efficiency and environmental responsibility. In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXPOSITION, 2001, Detroit. . SAE Paper 2001-01-3041. Detroit: SAE International, 2001.
- [23] SILVA, E. A. Estudo da correlação entre os modelos de encruamento e as características cristalográficas em aços avançados de alta resistência submetidos ao efeito springback. 2016. 206f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica –Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- [24] TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. Taguchi's quality engineering handbook. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1662p. 2005.

Capítulo 10

Professor do curso de engenharia civil: De uma prática pedagógica tradicional à uma ação docente inovadora

Hugo Alexander Martins Pereira

Resumo: Os engenheiros civis que buscam uma atuação na docência do ensino superior devido à sua formação com características técnicas, visando a atuação no mercado profissional, carecem de competências pedagógicas necessárias para uma ação docente eficiente e comprometida com a produção do conhecimento, dentro do paradigma inovador da educação. Tal observação motivou essa produção científica que tem por objetivo analisar o professor do curso de Engenharia Civil, apresentando características deste docente no modelo tradicional e alguns dos saberes do paradigma inovador, com um chamado à reflexão da prática pedagógica e do encaminhamento à formação continuada. Esta pesquisa é do tipo revisão bibliográfica com uma abordagem qualitativa, trazendo autores para construção de uma reflexão sobre a prática pedagógica deste docente da Engenharia. Como resultado, foi apresentado uma síntese sobre o assunto, destacando a necessidade da formação continuada deste docente, algumas estratégias de ensino que podem contribuir para uma ação transformadora e que os assuntos trabalhados, sirvam como um ponto de partida para uma reflexão profunda sobre qual tipo de professor este Engenheiro Civil quer ser.

Palavras-chave: Prática Pedagógica. Docência. Paradigma Inovador. Reflexão.

*Texto apresentado no Congresso EDUCERE (Congresso Nacional de Educação) 2015

1 INTRODUÇÃO

A construção de edificações, obras de infraestrutura, consultorias e elaboração de projetos, são temas do cotidiano do profissional graduado em Engenharia Civil. Sua profissão é regulamentada pela Lei 5.194 de 24 de dezembro de 1966, no qual define que os profissionais de engenharia: “...são caracterizados pelas realizações de interesse social e humano na realização dos [...] empreendimentos...”, ou seja, possui uma ampla formação técnica com a capacidade de realizar transformações na vida social das pessoas, destacando-se o perfil técnico, não se distanciando da formação social.

O Engenheiro Civil que inicia na docência, traz consigo suas experiências profissionais, no qual julga serem adequadas para passar aos seus alunos, uma vez que o contato com o mercado profissional lhe permite trazer esta linha de trabalho. Contudo, há também o perfil como docente, pois este profissional realiza sua transição dos canteiros de obras e escritórios de engenharia para o meio acadêmico e suas referências, serão seus professores do período da graduação e pós-graduação, uma vez que estes marcaram sua formação e os bons exemplos serão absorvidos por este novo professor, trazendo consigo a manutenção de uma escola tradicional e tecnicista da educação. Em resumo, este novo professor atua com um forte apelo ao ensino mecânico, que busca a repetição para o aperfeiçoamento deste profissional e seguir os ensinamentos de um engenheiro advindo do mercado, poderá formar melhores alunos.

Com essa atuação docente e empírica, estes profissionais necessitam de formação adequada e reflexão sobre a forma com a que já ministram suas aulas. A formação pedagógica deste professor não é apenas um discurso de pesquisadores da educação, é uma realidade do novo perfil das instituições de ensino, dos alunos e dos anseios na formação dos alunos. Um professor que tem como base um bacharelado e busca uma formação para atuação docente, abre para si um novo universo para a vida acadêmica, no qual compreenderá que ser professor é muito mais que apenas dar aula e aplicar provas. Esta reflexão sobre a formação e a prática pedagógica dos professores dos cursos de Engenharia é o tema desta pesquisa, no qual abordaremos nos capítulos a seguir.

2 A FORMAÇÃO PROFISSIONAL DO PROFESSOR DE ENGENHARIA CIVIL

Os cursos de graduação no Brasil são regulamentados de acordo com as Diretrizes Nacionais Curriculares, no qual são elaboradas pelo Conselho Nacional de Educação, na Câmara de Educação Superior. Ao entrarmos neste tema, podemos constatar um novo olhar sobre as características desejadas aos egressos dos cursos de engenharia, uma vez que a Resolução CNE/CES 11, de 11 de março de 2002 traz que:

Art. 3º O Curso de Graduação em Engenharia Civil tem como perfil do formando egresso/profissional o engenheiro, com formação generalista, humanista, crítica e reflexiva, capacitado a absorver e desenvolver novas tecnologias, estimulando a sua atuação crítica e criativa na identificação e resolução de problemas, considerando seus aspectos políticos, econômicos, sociais, ambientais e culturais, com visão ética e humanística, em atendimento às demandas da sociedade (MEC/CNE, 2002).

O perfil do egresso do curso de engenharia civil traz características que os novos paradigmas da educação buscam: capacidade reflexiva, atuação criativa para resolução de problemas que se apresentem na vida profissional, além dos saberes humanísticos fundamentais a sua atuação.

No entanto, estes aspectos descritos no perfil do egresso não estão presentes nas salas de aula de grande parte dos cursos de Engenharia Civil, seja pelo desejo das instituições de ensino que buscam apenas formar turmas e obter o ingresso de novos alunos, não se preocupando com a qualidade da formação, seja pela prática dos professores, que buscam um ensino cartesiano baseado em resolução de exercícios, com modelos prontos e acabados, sem estimular a reflexão para estas resoluções, seja pelos modelos fechados de avaliação que tem apenas em provas escritas uma fórmula para avaliar se o aluno possui as capacidades técnicas e sociais que o perfil do egresso apresenta.

Um ensino fechado, centrado no professor como o detentor do conhecimento e tendo o aluno apenas como um espectador passivo, não trará uma formação completa com profissionais generalistas, reflexivos, críticos consigo e com sua atuação. Este modelo de ensino, ultrapassado, pode ser sintetizado por Behrens (2013, p. 43) de uma forma bem clara: “Referendada por uma visão cartesiana, a metodologia fundamenta-se em quatro pilares: leia, escute, decore e repita”. Este processo mecânico, no qual o aluno não interage, o professor não busca contextualizar os saberes teóricos, não sai do modo automatizado de

ensino, leva a formação de um profissional extremamente sistemático e que ao se deparar com uma situação diferente da apresentada em sala de aula, encontra uma dificuldade em buscar a solução através da reflexão sobre o saber teórico.

Durante toda a trajetória do aluno no curso de Engenharia Civil, percebe-se a grande influência do paradigma tradicional da Educação, principalmente nas características do professor da escola tecnicista. Segundo Behrens (2013, p. 49): “A forte influência cartesiana leva o professor ao determinismo e ao racionalismo, e, com essa exigência o professor passa a aplicar a técnica pela técnica em busca da performance”, trazendo a nossa reflexão um professor que busca moldar seus alunos de acordo com sua concepção, visando um profissional acabado com as exigências do mercado de trabalho, deixando de lado outras características de extrema importância na formação do Engenheiro Civil, como já citado anteriormente.

Embora a formação do profissional de Engenharia Civil tenha como objetivo o mercado de trabalho, o modelo de aulas hoje apresentados pelos docentes deve ser repensado. Esta reflexão começa pela postura do professor, ao buscar uma formação continuada na área pedagógica melhorando assim sua performance como ele mesmo busca em seus alunos, do olhar sistêmico sobre o curso, com a integração dos conhecimentos apresentados nas mais diversas disciplinas, na contextualização desde o eixo mais básico até o profissionalizante com a atuação do futuro profissional, mostrando a estes alunos todas as possibilidades de atividade do mesmo após a conclusão de seu curso.

Uma vez que a formação do bacharel não tem por objetivo a atuação na docência, os cursos na área de Engenharia, procuram formar um aluno sistemático, que possa processar dados que se observem ao longo de um trabalho e que seja pragmático, e quando a formação continuada com especializações e/ou mestrado são sugeridos a este aluno, é focada na área técnica que este escolhe atuar. Esta formação técnica, até mesmo na especialização e/ou mestrado, é refletida na sala de aula, com Engenheiros Civis que iniciam a docência, com domínio do conteúdo, no entanto sem nenhuma formação para atuar na docência.

É natural que os professores iniciantes na docência do ensino superior, assim como outros profissionais em princípio de carreira, apresentem uma série de dúvidas, expectativas e ansiedades, tanto as relacionadas ao domínio do conteúdo específico de sua disciplina, quanto, principalmente, as vinculadas aos novos conceitos e propostas didáticas exigidas pelo sistema educacional vigente. (GAETA e MASETTO, 2013, p. 10).

Como Gaeta e Masetto (2013) trazem, este professor que inicia ou até mesmo os já experientes com a docência, ao deparar-se com as novas perspectivas de um ensino e uma ação do docente inovadora, vê-se num momento crucial de aprender a atuar como um docente, responsável por um processo de ensino e de aprendizagem, reforçando o pensamento que a docência não se resume em dar aulas e aplicar provas.

Esta falta na preparação do docente, traz várias complicações no processo de ensino e aprendizagem, pois sem formação adequada, como já citamos, este docente busca referências de seus antigos professores, trazendo métodos de ensino, avaliação e de condução da sala de aula em experiências positivas e até negativas observadas durante a sua formação acadêmica.

Behrens (1996) reforça este pensamento:

A falta de capacitação pedagógica incorre em graves problemas na ação docente. O professor por não ter preparo para a docência, escolhe ao livre arbítrio os métodos que vai utilizar para o enfrentamento da sala de aula. Invariavelmente, se reporta a um professor que o sensibilizou pela competência ou pelo relacionamento fraterno. A partir daí, tenta imitá-lo e reproduzir a ação docente desencadeada no processo em que foi aluno (BEHRENS, 1996, p. 50).

Uma reflexão importante se dá no perfil do profissional que então escolhe a docência. Já vimos que não basta se espelhar em experiências antigas para nortear sua atuação ou então que:

Ser docente do ensino superior não pode ser confundido com a “boa vontade de algumas horas do meu tempo para ajudar os alunos de um curso”; não pode ser confundido com “um bico que vou fazer para melhorar meu salário”; não pode ser confundido com a possível

capacidade de comunicar algumas experiências profissionais aos alunos. (GAETA e MASETTO, 2013, p. 97).

A ampla formação profissional do Engenheiro Civil, permite a ele atuar num vasto campo de trabalho como a Construção Civil – projetos para edificações e execução de obras –, Transportes e Urbanismo – com o gerenciamento do trânsito, transporte urbano, participação no planejamento de cidades, dimensionamento de redes de transporte, planejamento, projeto e execução de obras de infraestrutura para transportes –, Hidráulica – projeto de barragens, canais, redes de distribuição de água, sistemas de tratamento de água, sistemas de tratamento de esgoto sanitário, projetos residenciais –, além de outras áreas. Estas por sua vez, se apresentarão a este docente como suas futuras disciplinas a serem ministradas, ou seja, para este profissional o conhecimento técnico necessário à sua atenção é contemplado durante a sua formação, o que lhe falta é a formação para atuar como docente, os saberes necessários para sua prática pedagógica.

3 A FORMAÇÃO CONTINUADA DO PROFESSOR DE ENGENHARIA CIVIL

Após os cinco anos ou mais de formação na área técnica da Engenharia Civil, o profissional que entra na docência pode não possuir a formação adequada para exercer o magistério, como os profissionais da Pedagogia, dos licenciados em Ciências Exatas e Humanas, no qual possuem um embasamento teórico e prático ao longo de sua formação, visando a atuação na docência. Não pode este profissional simplesmente decidir que é hora de entrar na sala de aula como professor e passar suas experiências.

O aluno da Engenharia Civil é formado para a atuação no mercado de trabalho da Construção Civil, projetos, infraestrutura, entre outras. É baseado nesta análise que a formação continuada se faz necessária, para o profissional também seja professor e o conhecimento dos saberes docentes, necessários para sua atuação.

Ao falarmos da necessidade da formação continuada do Engenheiro Civil visando a atuação no Ensino, não podemos deixar de destacar quais as características pedagógicas normalmente presentes nas Escolas de Engenharia. A pesquisa na educação busca uma reflexão da prática pedagógica, superando o paradigma tradicional na caminhada em direção a uma prática aliada ao paradigma inovador.

O professor com características tradicionais é aquele que:

[...] apresenta o conteúdo para seus alunos como pronto e acabado. Busca repassar e transmitir as informações de maneira que os alunos possam repetir e reproduzir o modelo proposto. Como dono da verdade, apresenta-se autoritário, severo, rigoroso e objetivo. Distante dos alunos, procura discipliná-los na sala de aula em nome da obediência, da organização e do silêncio. Apresenta os conteúdos de maneira fragmentada, com uma organização em partes, enfocando o conhecimento como absoluto e inquestionável. (BEHRENS, 2013, p. 42).

Outra linha de pensamento de reforça uma visão centrada no professor e ele, se apresentando como um detentor do conhecimento a ser repassado, é proposto por Masetto (2015, p. 15) no qual: “Ensinar significava ministrar aulas expositivas ou palestras a respeito de determinado assunto dominado pelo conferencista, mostrar na prática como se fazia – e isso qualquer profissional saberia fazer”. A forte presença do modelo de mão única: professor ensina e aluno aprende, professor domina e aluno busca nele o conhecimento, necessita ser superado. Hoje em sala de aula, num instante o aluno pode pesquisar novas informações e complementar o que ouviu em sala, ou seja, não há como sustentar esta linha de que o professor é a base do conhecimento e por este aspecto, além de uma busca por respeito, ser um dominador do espaço da sala de aula, no qual deveria ser privilegiado a produção do conhecimento e não uma replicação do mesmo.

Ainda se percebe a presença destas características nas Escolas de Engenharia, uma vez que os professores oriundos do mercado de trabalho não possuem preparo para a atuação docente, trazendo características de sua formação.

Na busca por uma nova prática pedagógica, espera-se inicialmente uma reflexão deste docente, numa busca pelo aprendizado, pela produção do conhecimento e não apenas por métodos de memorização, no

qual são apresentadas informações que não se convertem em conhecimento, sem aplicabilidade, sem contextualização daquele saber.

Para Ibernón (2010, p.11), a formação continuada é, portanto, um preparo deste profissional para atuação na docência, no qual “[...] passa pela condição de que estes vão assumindo uma identidade docente”. A necessidade de formação continuada é inerente àqueles que buscam uma atuação na docência. Hoje, com a evolução das tecnologias da informação, dos meios de comunicação e da facilidade no acesso às informações, o professor que busca uma atuação aliada ao paradigma inovador, necessita buscar conhecimento e aprimoramento constante.

A mudança está, portanto, na postura do professor, voltado para um olhar ampliado e periférico das ações educacionais, mais dialético e menos cartesiano, verificando as possibilidades e buscando novas ferramentas, recursos tecnológicos e abordagens pedagógicas [...]. O desejável é um educador que vá além, saia da zona de conforto e inove, que “olhe para além da moldura” (MULLER e OLIVEIRA, 2013, p. 17).

No entanto, não basta apenas o docente repensar sua forma e atuação, se as ferramentas e os meios que utiliza na condução de suas aulas, não representem um novo pensar sobre a educação. Destaca-se a necessidade da reflexão sobre a metodologia aplicada nas aulas, uma vez que no paradigma tradicional a aula pode ser vista como um momento de reprodução do conhecimento, tendo em vista as características deste aluno inserido num paradigma educacional tradicional:

A prática pedagógica do professor que busca as características deste novo paradigma necessita de um olhar não apenas sobre as aulas, assim como na forma de avaliação do processo pedagógico, da busca pela produção do conhecimento, no relacionamento com os alunos.

Essa formação a que nos referimos deve ajudar o professor a desenvolver a sua profissionalidade, na medida em que o capacita a fazer uma análise do contexto educativo em que se encontra para então revisar e, se necessário, transformar suas práticas em busca de melhores resultados na aprendizagem. (GAETA e MASETTO, 2013, p. 107).

4 A PRÁTICA PEDAGÓGICA NO PARADIGMA INOVADOR

Vale ressaltar que apenas a busca por informações sobre uma prática pedagógica aliada ao paradigma inovador não é suficiente para a educação no ensino superior, contudo esta pode ser encarada como um ponto de partida visando uma formação continuada e melhor preparo para este docente.

As considerações ou reflexões até agora feitas vêm sendo desdobramentos de um primeiro saber inicialmente apontado como necessário à formação docente [...]. Saber que ensinar não é transferir conhecimento, mas criar possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção. Quando entro em sala de aula devo estar sendo um ser aberto a indagações, às curiosidades, às perguntas dos alunos, a suas inibições; um ser crítico e inquiridor, inquieto a face da tarefa que tenho – a de ensinar e não a de transferir o conhecimento (FREIRE, 1992, p. 47).

Partindo de uma reflexão sobre a sua atuação docente, o professor que atua no paradigma inovador possui algumas características que irão contribuir para que busque “[...] ultrapassar a reprodução para a produção do conhecimento, o professor precisa buscar caminhos alternativos que alicercem uma ação docente relevante, significativa e competente” (BEHRENS, 2013, p. 62). A superação do processo mecânico de reprodução, de memorização, ainda presente na educação da Engenharia Civil é um dos pontos principais que este docente precisa rever em sua prática.

Ao falarmos da prática pedagógica no paradigma inovador, novas estratégias devem estar presentes no planejamento das aulas deste docente, buscando a produção do conhecimento. Não são poucas as estratégias de ensino que o professor pode adotar, neste artigo serão discutidos dois métodos com grande potencial a ser trabalhado nos cursos de Engenharia Civil: ensino com pesquisa e o ensino baseado em projetos.

A abordagem do ensino com pesquisa, estimula a produção do conhecimento do professor e do aluno, com autonomia do aluno processo, deixando de lado o ensino com base apenas em livros e aulas com a

exposição dos conteúdos (Behrens, 2013). Essa técnica na Engenharia Civil tem potencial para resolução de problemas, com pesquisas de soluções viáveis, discussão de resultados e inserção do aluno na pesquisa científica, pois ao longo de seu curso o mesmo poderá trabalhar com o professor num modelo diferente dos tradicionais trabalhos para apresentar. O ensino com pesquisa, busca ir além com uma reflexão crítica sobre os saberes pesquisados, sua aplicabilidade, o tratamento qualitativo da informação, a produção de textos técnicos. Para Masetto (2015), o ensino com pesquisa:

[...] é uma estratégia que pode ser usada uma vez no semestre ou duas no ano, dado o tempo que ela consome. [...] Não será suficiente “mandar os alunos fazer pesquisa”. Será necessário instruir como se faz uma pesquisa e acompanhar a sua realização (MASETTO, 2015, p. 118).

O ensino com pesquisa se apresenta como um caminho de produção do conhecimento, o professor se colocando como mediador do processo, ou seja, mostrando os caminhos para se chegar aos objetivos, atuando em conjunto com os alunos e instigando os mesmos, com problematizações, sem soluções únicas e acabadas, com a reflexão sobre as novas informações, apresenta-se como uma estratégia adequada, no entanto não podendo ser a única.

Todavia, nota-se um repertório limitado nos docentes da Engenharia Civil, com foco em aulas expositivas e resolução de exercícios. A busca por novos saberes docentes e novas estratégias de ensino, evidencia a necessidade da formação continuada. O professor deve buscar uma ótima aula, dentro desta reflexão como Antunes (2013, p. 49) nos diz que “Uma aula é excelente, no Brasil ou em qualquer país do mundo, quando alcança com facilidade seu objetivo essencial, no caso “ajudar o aluno a construir a sua própria aprendizagem”.”

De acordo com esse entendimento, o termo aula não se aplica somente à aula expositiva, mas a todas as formas didáticas organizadas e dirigidas direta ou indiretamente pelo professor, tendo em vista realizar o ensino e a aprendizagem. Em outras palavras, a aula é toda situação didática na qual se põe objetivos, conhecimentos, problemas, desafios, com fins instrutivos e formativos, que incitam as crianças e jovens a aprender (LIBÂNEO, 2013, p. 196).

Na Engenharia Civil ou em outras, uma estratégia que o docente pode buscar e que se apresenta com eficiência no caminho de produção do conhecimento é o ensino por projetos. Se considerarmos que o currículo do curso de Engenharia Civil prepara este futuro profissional a atuar com projetos em diversas áreas, a abertura de um método de ensino sem uma única resposta, com o aluno se posicionando como centro do processo, mostra-se como uma estratégia a ser considerada pelo docente. Masetto (2015), traz a relação entre as estratégias que envolvem estudos de caso, ensino com pesquisa e ensino por projetos:

No estudo de caso, o aluno aprende a resolver problemas, no ensino com pesquisa aprende a pesquisar, elaborar relatórios científicos, debater com os colegas os resultados obtidos nas várias pesquisas. Um dos objetivos do ensino por projetos é criar condições para que o aluno aprenda a propor o encaminhamento e desenvolvimento de determinada situação (MASETTO, 2015, p. 120).

Abrir as possibilidades para o aluno ser um agente ativo no processo de ensino e aprendizagem, é uma das características do professor que busca esta ação docente com foco na produção do conhecimento, aliado ao paradigma inovador da educação.

Esta técnica pode contribuir com a falta de motivação que os alunos observam ao longo do curso, quando se perguntam qual a aplicabilidade dos conteúdos apresentados ou em áreas técnicas, ir além de exercícios comentados em sala. Ao trabalhar com projetos, os alunos se posicionam como profissionais, precisando de aplicar seus saberes técnicos para propor a solução mais adequada, sem que esta seja única. Ao professor do curso de Engenharia Civil, são variadas as disciplinas para que esta estratégia seja aplicada, podendo citar aqui as áreas de Projeto Arquitetônico, Topografia, Projetos Estruturais (Concreto Armado, Concreto Protendido, Aço, Madeira, Alvenaria Estrutural), Projetos de Instalações (Elétricas, Hidrosanitárias, Incêndio, Gás), entre outras. Mostrar ao aluno que ele detém os caminhos para sua própria aprendizagem, nessa situação real contribui a uma formação que foque na competência e não em aprovações baseadas em provas.

Não basta aplicar novas técnicas de ensino e não rever seu processo de avaliação. Os modelos que focam apenas em provas e verificações individuais, não identifica se o aluno evoluiu na busca da competência

desejada pelo perfil do egresso e sim o classifica, rotula, com uma determinada nota, atribuída a questões resolvidas com precisão ou não.

A avaliação acaba sendo um ponto polêmico na didática do professor, para isso, algumas reflexões são necessárias para a continuidade da nossa pesquisa. Numa perspectiva inovadora, a avaliação:

[...] é contínua, processual e transformadora. Perdendo o caráter punitivo, empreende o processo de participação individual e coletivo. Contempla momentos de Autoavaliação e de avaliação grupal. A avaliação mútua no grupo gera um enriquecimento significativo no processo educativo. Por ser responsável, criativo e reflexivo, o aluno participa da composição dos critérios para avaliação. A exigência, a rigorosidade e a competência são pilares sustentadores da avaliação, mas são propostas a serem desenvolvidas com os alunos, num processo de relação de parcerias, em que todos são responsáveis pelo sucesso e pelo fracasso do grupo (BEHRENS, 2013, p. 78).

Neste aspecto, destaca-se a importância do papel do professor na condução do processo, no diálogo com os alunos, na definição dos critérios, sem perder a rigorosidade do processo. Num olhar diferente sobre a avaliação, as questões em provas, caso este seja o instrumento, não buscam memorização e repetição do conhecimento, contudo buscam reflexão, autonomia e produção do aluno.

A avaliação como forma de classificar os alunos como bons ou ruins e numa visão ultrapassada, valorizar aquele professor cujo desempenho dos alunos em suas provas seja baixo, deve ser superado por uma visão diferenciada, entendendo primeiramente o que é a avaliação no processo pedagógico.

Uma reflexão interessante é proposta por Libâneo (2013):

O mais comum é tomar a avaliação unicamente como o ato de aplicar provas, atribuir notas e classificar os alunos. O professor reduz a avaliação à cobrança daquilo que o aluno memorizou e usa a nota somente como instrumento de controle. Ainda hoje há professores que se vangloriam por deter o poder de provar ou reprovar. Quantas vezes se ouvem afirmações inteiramente falsas sobre o que deve ser um trabalho docente de qualidade, como por exemplo: “O professor X é excelente, reprova mais da metade da classe”, “O ensino naquela escola é muito puxado, poucos alunos conseguem aprovação”. Tal ideia é descabida, primeiro porque a atribuição de notas visa apenas o controle formal, com objetivo classificatório e não educativo; segundo, porque o que importa é o veredicto do professor sobre o grau de adequação e conformidade do aluno ao conteúdo que transmite. Essa atitude ignora a complexidade de fatores que envolve o ensino [...] (LIBÂNEO, 2013, p. 219).

O professor que busca uma atuação no paradigma inovador, necessita de um aprofundamento pedagógico, desde os saberes necessários a elaboração de uma aula, as estratégias de ensino, postura, avaliação. A leitura de forma resumida de fontes para subsidiar sua ação docente é insuficiente e trará apenas informações que não sustentam uma prática pedagógica eficiente que visa a produção do conhecimento.

Por fim, a avaliação é uma reflexão da prática pedagógica do professor e “O entendimento correto da avaliação consiste em considerar a relação mútua entre os aspectos quantitativos e qualitativos” (LIBÂNEO, 2013, p. 221).

Ao refletirmos sobre o nosso papel, entendendo que a didática vai além da prova e do quadro, a prática pedagógica do professor deve ser motivo para atualização constante, busca de novas informações, saberes, estratégias. Esse professor:

[...] passa a ter uma nova proposição pedagógica em que se torna o articulador e o orquestrador do processo pedagógico. Atua em parceria com os alunos, propõe atendimento diferenciado, frequenta biblioteca e laboratórios de informática junto com os estudantes. Abre os laboratórios historicamente chaveados no sistema escolar vigente, torna a escola um espaço aberto para criação, provoca situações desafiadoras, instiga o aluno a buscar e investigar novos caminhos, acolhe os estudantes que passam a frequentar a escola também em horários

alternativos, motivando a revolução dos meios acadêmicos reprodutivos (BEHRENS, 2013, p. 110).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A educação no ensino superior exige uma nova forma de atuação docente, que busque características de um novo paradigma aliado à produção do conhecimento.

O Engenheiro Civil que busque a carreira docente necessita ter uma formação pedagógica para uma ação docente eficiente e comprometida com o aprendizado do aluno e não com a reprodução do conhecimento, com a memorização e mecanização do ensino.

É insuficiente uma visão de dedicar algumas horas vagas de seu cotidiano, para repassar seus conhecimentos e experiências aos futuros novos profissionais. O profissional que busca a docência, necessita sim ser competente numa determinada área do conhecimento que pretende trabalhar, buscando aperfeiçoamento contínuo de forma técnica, no entanto este parâmetro não é o único do ciclo de atualização.

A necessidade de formação pedagógica se faz presente, para que o novo professor supere modelos ultrapassados que não atendam as novas exigências de uma educação transformadora. Basear-se em experiências com professores de sua graduação ou pós-graduação, está longe da preparação adequada que o docente deve ter para uma atuação inovadora, que busque constantemente a produção do conhecimento.

Não basta apenas realizar leituras ou participar de cursos de curta duração, tais atitudes devem se tornar o ponto de partida para sua formação continuada, visando a construção das competências necessárias para uma ação docente transformadora.

A titulação de um profissional não deve ser encarada como um escudo frente às competências pedagógicas para uma ação docente. Independente da formação a nível de pós-graduação, o professor antes de entrar em uma sala de aula para sua atuação, deve refletir sobre o seu real papel na vida de seus alunos e o seu papel em sua própria história, respondendo a uma pergunta: que tipo de docente quero ser?

A resposta para esta pergunta fica a critério de cada professor, no qual espera-se que sua atuação não seja restrita a dar aulas, sem provocar uma transformação na vida dos alunos e na sua, sem buscar a produção do conhecimento e focar na aprendizagem.

REFERÊNCIAS

- [1] ANTUNES, Celso. Professores e Professores. 7. ed. Petrópolis: Vozes, 2013. 199 p.
- [2] BEHRENS, Marilda Aparecida. Formação Continuada dos Professores e a Prática Pedagógica. Curitiba: Champagnat, 1996. 251 p.
- [3] _____. O paradigma emergente e a prática pedagógica. 6. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2013. 117 p.
- [5] BRASIL, MEC/CNE. Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia Civil. Resolução CNE/CP 11/2002. Diário Oficial da União, Brasília, 9 de Abril de 2002. Seção 1, p. 32. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf>> Acesso em: 13 set. 2015.
- [6] BRASIL. Planalto. Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966. Brasília, 1966. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5194.htm>. Acesso em: 13 set. 2015.
- [7] FREIRE, Paulo. Pedagogia da Autonomia. 47. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2013. 143 p.
- [8] GAETA, Cecília; MASETTO, Marcos Tarciso. O professor iniciante no ensino superior: aprender, atuar e inovar. São Paulo: SENAC, 2013. 139 p.
- [9] IBERNÓN, Francisco. Formação continuada de Professores. Porto Alegre: Artmed, 2010. 120 p.
- [10] LIBÂNEO, José Carlos. Didática. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2013. 287 p.
- [11] MASETTO, Marcos Tarciso. Competência pedagógica do professor universitário. 3. ed. São Paulo: Summus, 2015.
- [12] MULLER, Claudia Cristina; OLIVEIRA, Regiane Brigola de. Recursos Multimídias para Educação. Ponta Grossa: Estúdio Texto, 2013. 120 p.

Capítulo 11

Análise das disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear no curso de Engenharia de Produção

Janaina Fernanda Marcolin

André Sandmann

Denise Martinhago

Everton Coimbra de Araújo

Resumo: São muitos os estudos sobre as dificuldades de aprendizagem e os altos índices de reprovação nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral - CDI e Álgebra Linear nos cursos de Engenharia, e apesar de existirem diversas pesquisas realizadas e sugestões feitas visando minimizar estes problemas, hoje ainda se verifica altos índices de reprovações nestas disciplinas. Com esta pesquisa, pretende-se mostrar que o índice de não-aprovação nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear são muito elevados, mostrando assim a necessidade eminente de intervenções metodológicas nos primeiros períodos desses cursos. Além da revisão bibliográfica, com a finalidade de expor a luz da literatura o tema a que remete essa pesquisa, foi realizado um estudo de caso referente aos índices de aprovação, reprovação e desistência nos anos 2016, 2017 (1º e 2º semestres) e 2018 (1º semestre) nas disciplinas em questão do curso de Engenharia de Produção, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus de Medianeira. Para isso foi realizada uma análise do comportamento das turmas baseados nos diários de classes dos professores dessas disciplinas. Os resultados foram comparados com pesquisas de outros autores realizadas em anos anteriores e verificou-se que esses altos índices de reprovações, é uma realidade de vários anos na UTFPR de Medianeira, e hoje o cenário continua o mesmo de anos atrás.

Palavras chave: Dificuldades em Matemática, Engenharia de Produção, Cálculo Diferencial e Integral, Álgebra Linear.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve no Brasil uma crescente expansão do Ensino Superior, o que ampliou consideravelmente o número de matrículas em Universidades. Porém, assim como aumentou o número de matrículas, aumentou também o número de evasão e reprovação, principalmente em cursos que possuem disciplinas de Ciências Exatas em sua grade curricular.

Na maioria das vezes isso acontece, pois, esses alunos que chegam a Universidade vêm com uma profunda defasagem de conhecimento em matemática, dada a falta de qualidade da educação básica. Essa defasagem de conhecimento é percebida nos primeiros semestres onde são ministradas as disciplinas básicas do curso, entre elas, as disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral (CDI) e Álgebra Linear.

Portanto com esta pesquisa, buscou-se analisar como estão os índices de aprovação, reprovação e evasão dos alunos do curso de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira, nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear.

Para isso, inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a expansão Universitária no Brasil e a Evasão dos alunos nos cursos de engenharia para compreender, em dados numéricos, como estão os índices de aprovação, reprovação e evasão dos alunos nos cursos de engenharia. Em seguida foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre as dificuldades de aprendizagem nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e na disciplina de Álgebra Linear nos cursos de Engenharia. Posteriormente é feita uma breve discussão sobre a Engenharia de Produção. Após a pesquisa bibliográfica, são apresentados os dados coletados na pesquisa realizada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção é apresentada a pesquisa bibliográfica realizada. A revisão bibliográfica visa apresentar, em primeiro momento, dados sobre a expansão universitária e sobre a evasão dos alunos nos cursos de engenharia. Em um segundo momento é apresentado o que autores relatam em suas pesquisas sobre as dificuldades de aprendizagem na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral e na disciplina de Álgebra Linear nos cursos de engenharias. Após é explanado sobre o curso de engenharia de produção, em especial sobre a importância destas disciplinas neste curso.

2.1 EXPANSÃO UNIVERSITÁRIA NO BRASIL E A EVASÃO NOS CURSOS DE ENGENHARIA

O número de matrículas nos cursos de Ensino Superior desacelerou se comparado aos anos anteriores, mas continua crescendo. Segundo o Censo da Educação Superior de 2016, “entre 2006 e 2016, a matrícula na educação superior aumentou 62,8%, com uma média anual de 5% de crescimento. Em relação a 2015, a variação positiva foi de apenas 0,2%” (CENSO, 2016).

Mesmo com esse pequeno aumento comparando ao ano anterior, o número de alunos matriculados em Instituições de Ensino Superior – IES é bastante grande, como mostra o Gráfico 1, em 2016 teve-se mais de 8 milhões de matrículas em graduações.

Gráfico 1 - Número de alunos matriculados em IES de 2006 a 2016

Fonte: CENSO, 2016

Dessas 8.052.254 matrículas, 53,7% (4,3 milhões) estão concentradas nas universidades. Vale destacar que as 197 universidades existentes no Brasil equivalem apenas a 8,2% do total de Instituições de Ensino Superior – IES. Dessas 197 universidades, 108 são públicas e 89 são privadas (CENSO, 2016). Portanto, vemos que mais da metade das matrículas são em Universidades, porém estas correspondem a uma pequena parte das IES existentes, ou seja, o cenário que temos nas Universidades, são salas com muitos alunos o que acaba por dificultar o aprendizado destes, já que o professor não consegue dar atenção a todos como deveria.

Segundo o CENSO de 2016, os cursos de bacharelado correspondiam a 69% do total de matrículas, e teve um crescimento de 74,9% nas matrículas de 2006 a 2016 (CENSO, 2016). Ainda segundo pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE), em 2017, tinha no Brasil 5.583 cursos de Engenharia. Segundo dados do Inep, em 2016, o Brasil formou 100.421 novos engenheiros, sendo 71,58% por instituições de ensino privadas e 28,42% públicas. Do total de formandos, 35.360 foram da Engenharia Civil, 17.344 de Produção, 11.434 Mecânica e 9.728 Elétrica (UNICESUMAR, 2017).

Esses formandos representam apenas 54,28% dos que ingressaram na faculdade. Segundo o Inep, de cada mil candidatos que prestam vestibular para um curso de Engenharia no Brasil, apenas 175 ingressam numa faculdade. Desses, somente 95 concluem os cursos (UNICESUMAR, 2017).

Analisando esses dados vemos que quase metade dos alunos (45,72%) que iniciam em cursos de engenharia não terminam o curso. São muitas as causas responsáveis por essa evasão dos alunos nos cursos de engenharia. Segundo Gómez (2015), uma das principais causas da evasão dos alunos dos cursos de Engenharia, é as dificuldades dos alunos com as disciplinas de Ciências Exatas (GÓMEZ, 2015).

Segundo Teixeira, Pereira e Barroso (2013), os altos índices de evasão nos cursos de engenharia nos dois primeiros anos são muito grandes, principalmente nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e na disciplina Álgebra Linear. “Os índices de reprovação são igualmente muito elevados e são frequentes as queixas dos estudantes relativas ao seu nível de abstração” (TEIXEIRA; PEREIRA; BARROSO, 2013).

2.2 DIFICULDADES DE APRENDIZAGEM EM CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL E ÁLGEBRA LINEAR NOS CURSOS DE ENGENHARIA

A matemática, uma ciência exata, é a base para a educação e formação do profissional de engenharia e através da sua aplicação forma conceitos imprescindíveis na formação do engenheiro, de dimensionamento, lógica e aplicações gerais (LORENZATO, 2010).

O principal papel da matemática nos cursos de engenharia é fornecer aos alunos subsídios que os permitam interpretar os dados, analisar os modelos propostos, afim de que consigam melhor representar a realidade, adquirindo ferramentas que lhes possibilite a resolução de problemas (PINHEIRO; MORETTI, 2003).

As disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear ocupam lugar de destaque nas diversas áreas da engenharia. Para Machado (1999) o Cálculo Diferencial e Integral é um conhecimento que permite, nas mais variadas áreas do conhecimento, prever, calcular, otimizar, medir, analisar o desempenho e performance de experiências, estimar, proceder a análises estatísticas e análise sistemática de modelos e ainda desenvolver padrões de eficiência que beneficiam o desenvolvimento social, econômico e humanístico (MACHADO, 1999).

Segundo Teixeira, Pereira e Barroso (2013), a Álgebra Linear consiste no estudo detalhado de sistemas de equações lineares, sejam elas algébricas ou diferenciais, ou seja, utiliza de alguns conceitos como vetores, espaços vetoriais, transformações lineares, sistemas de equações lineares e matrizes. Com os conhecimentos desta disciplina o engenheiro pode fazer uso de sistemas lineares para tratar de situações que envolvam n variáveis relacionadas através de m equações (TEIXEIRA; PEREIRA; BARROSO, 2013).

Para ter um bom desempenho nas disciplinas afins da matemática, desenvolver os conceitos necessários ao aprendizado, conseguir a aprovação na disciplina e posteriormente colocar em prática o que aprendeu, exige muita dedicação e persistência do aluno (MENONCIN; et al, 2010). Porém, a dificuldade de aprendizagem nessas disciplinas é muito grande. “A necessidade de formar engenheiros e a dificuldade de aprovação nas disciplinas de exatas é sem dúvida um problema generalizado, e o índice de reprovações nestas disciplinas é crescente” (MENONCIN; et al, 2010).

Segundo Firmino e Siqueira (2017), “as dificuldades dos alunos nos conteúdos básicos para desenvolver estratégias de resoluções de problemas na Matemática, são trazidas do ensino básico”. Ao chegar no Ensino Superior o aluno se depara com as disciplinas de matemática, como Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear. Dificilmente os conteúdos de pré-cálculo são estudados no ensino médio, assim o primeiro contato com conteúdo de Cálculo se dá nos primeiros semestres do ensino superior (FIRMINO; SIQUEIRA, 2017).

Menoncin, et al (2010), também afirmam que entre os prováveis motivos das dificuldades de aprendizagem destas disciplinas e responsável pelo grande número de reprovações, está a ausência de uma base matemática sólida durante todo o período da vida escolar do aluno (MENONCIN; et al, 2010).

Para Machado (2008) algumas das possíveis causas para as dificuldades do ensino-aprendizagem de Cálculo são as causas de natureza cognitiva, didática e epistemológica. Nas causas de natureza cognitiva, os alunos não apresentam estruturas cognitivas capazes de compreender as complexidades do Cálculo; nas causas de natureza didática, as dificuldades estariam em encontrar a metodologia mais adequada ao ensino; e nas dificuldades de natureza epistemológica se baseia na ideia que as deficiências referentes ao ensino de Cálculo são anteriores ao espaço-tempo local do ensino de Cálculo (MACHADO, 2008).

Ao ingressarem na Universidade, os alunos não percebem a importância das disciplinas básicas de seu curso como por exemplo as disciplinas de Cálculo e Álgebra Linear, e as reprovações, em geral, são atribuídas às dificuldades dos conteúdos, mas na verdade segundo Firmino e Siqueira, muitos alunos não se interessam na procura de conhecimentos que auxiliem na compreensão e nas aplicações dos conteúdos limitando-se ao que aprendem em sala de aula (FIRMINO; SIQUEIRA, 2017).

Com isso, muitos alunos que ingressam nas Universidades em cursos que possui disciplinas de ciências exatas são reprovados nos primeiros períodos, tendo que refazer a disciplina, o que acaba levando ao abandono do curso e até mesmo influência na decisão de não se matricular em um curso de graduação no qual a disciplina seja obrigatória (RAFAEL; ESCHER, 2016).

2.3 ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

“A engenharia acompanha o homem desde suas origens. Para sobreviver diante de tantos desafios aos quais era exposto diariamente, e evoluir durante os séculos, só seria possível com capacidade inventiva refletida no que hoje se denomina engenharia” (GÓMEZ, P. 51, 2015).

Existem vários ramos na engenharia. A engenharia de produção é uma delas. O profissional de engenharia de produção deve ter capacidade de solucionar problemas logísticos nas indústrias, estoque, área de produção, técnicas para colocar produtos no mercado, marketing, agregar valor à produção primária, e também desempenhar funções gerenciais e de liderança administrativa em todos os níveis de organização (GÓMEZ, P. 83, 2015).

Para se tornar um bom profissional na área de engenharia de produção, precisa-se ter um bom conhecimento na área de ciências exatas. Em seu blog, a professora Rita de Cássia Carvalho Silva, fala sobre a importância da matemática na engenharia. Segundo esta autora, “ser engenheiro significa ser um profissional com raciocínio lógico”. Por este motivo vemos que a matemática, ou seja, a ciência exata, é muito importante para o profissional de engenharia de produção. O profissional de engenharia deve ser capaz de aliar conhecimentos científicos e matemáticos para produzir avanços em sua área (SILVA, 2017).

Dessa forma, é fundamental que o aluno perceba a importância das teorias, das definições e dos teoremas apresentadas no decorrer das disciplinas de exatas, cujos conteúdos são bastante aplicados em disciplinas específicas da engenharia, para que assim, o discente consiga apreender tais conceitos, visando no desenvolvimento de seu raciocínio abstrato e lógico-matemático (TEIXEIRA; PEREIRA; BARROSO, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus de Medianeira. A coleta de dados é referente às disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear, nas turmas de Engenharia de Produção, nos anos de 2016, 2017 e 2018. Além do curso de Engenharia de Produção, foram levantados dados de outras engenharias para serem comparados com os dados da Engenharia de Produção.

Estas disciplinas são ofertadas no primeiro semestre do curso. Como o curso é semestral, a cada semestre têm-se novas turmas iniciantes. Portanto foi realizada a análise destas disciplinas ofertadas no 1º e 2º semestre de 2016 e 2017 e no 1º semestre de 2018.

O intuito desta pesquisa foi analisar os índices de aprovação, reprovação e evasão dos alunos durante esses anos nas disciplinas acima citadas. Para isso foi realizado uma análise do comportamento das turmas baseados nos diários de classes dos professores dessas disciplinas.

Após a análise feita, foi computado os dados e organizados em tabelas para serem construídos gráficos a fim de apresentar ao leitor os dados coletados de uma forma mais dinâmica e de fácil compreensão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversas são as pesquisas que apresentam discussões sobre às dificuldades dos estudantes de engenharia nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear, além de muitas pesquisas que apontam e discutem sobre os índices de não-aprovação nestas disciplinas.

Em sua tese de doutorado, Rezende (2003) mostra dados expressivos sobre a situação na Universidade Federal Fluminense em relação as dificuldades dos alunos nestas disciplinas e consequentemente o alto índice de reprovação. Da mesma forma, Pereira (2009) mostra o caso na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rafael e Escher (2016), apresentam a situação enfrentada por uma instituição privada situada na região serrana do estado do Rio de Janeiro que continua sendo a mesma, com altos índices de reprovações nessas disciplinas.

Além destas pesquisas, o trabalho realizado por Gasparin et al. (2014) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus de Medianeira, mesma Universidade que foi realizada esta pesquisa, mostra a mesma situação das Universidades anteriores. Através de um questionário aplicado no final do segundo semestre de 2012 nos cursos de engenharia, os autores concluíram que os alunos apresentam muitas dificuldades nos conteúdos matemáticos, apresentando assim alto índice de reprovação nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e na disciplina de Álgebra Linear.

Portanto, verifica-se que esta dificuldade de aprendizado nestas disciplinas sempre foi algo preocupante nas Universidades, e por mais das diversas pesquisas realizadas e sugestões feitas afim de resolver este problema, ainda se constata altos índices de reprovações nestas disciplinas. O Gráfico 2 mostra a realidade dos cursos de engenharias da UTFPR - Campus Medianeira, referente ao número de não-aprovação nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear (CDI) no primeiro semestre de 2018.

Gráfico 2 - Índice de não-aprovação nas disciplinas de CDI e Álgebra Linear no 1º semestre de 2018, nos cursos de Engenharia da UTFPR – Medianeira

No curso de Engenharia de Alimentos, no 1º semestre de 2018 teve 70 alunos (77,8%) não-aprovados em CDI e 52 alunos (75,4%) não-aprovados em Álgebra Linear. Em Engenharia Elétrica, 66 alunos (70,2%) não foram aprovados em CDI e 60 alunos (67,4%) reprovaram em Álgebra Linear. Na Engenharia Ambiental, obteve-se neste período, 69 alunos (76,7%) não-aprovados em CDI e 57 alunos (78,1%) não-

aprovados em Álgebra Linear. E o curso de Engenharia de Produção finalizou o semestre com 84 alunos (75,7%) não-aprovados em CDI e 66 alunos (65,3%) não-aprovados em Álgebra Linear.

Observando o Gráfico 2, pode-se perceber que o número de alunos não- aprovados (reprovados por nota e reprovados por frequência) é bastante expressivo. A dificuldade de aprendizagem nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear é realidade em todos os cursos de Engenharia ofertados na UTFPR de Medianeira.

No Gráfico 3, observa-se como foi o andamento do Curso de Engenharia de Produção durante os anos de 2016 a 2018, na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral, referente ao número de aprovação e reprovação por nota e frequência.

Gráfico 3 - Aprovação e reprovação por nota e frequência em CDI no curso de Engenharia de Produção

Na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral o número de aprovados manteve-se praticamente igual de 2016 a 2018, tendo um aumento em 2017, mas decaiu um pouco em 2018. O número de reprovados por nota teve uma diminuição do 2º semestre de 2016 ao 2º semestre de 2017, mas voltou a aumentar no 1º semestre de 2018. Em relação ao número de desistentes teve uma diminuição de 2017 a 2018.

O Gráfico 4 mostra a relação dos alunos aprovados e reprovados por nota e frequência na disciplina de Álgebra Linear do curso de Engenharia de Produção durante os anos de 2016 a 2018.

Gráfico 4 - Aprovação e reprovação por nota e frequência em Álgebra Linear no curso de Engenharia de Produção

Na disciplina de Álgebra Linear, verifica-se que de 2016 ao 1º semestre de 2017 teve um aumento no número de reprovados, mas depois teve uma diminuição até 2018. Em relação ao número de aprovados, teve um aumento de 2016 a 2018. Porém teve também um aumento no número de desistentes de 2017 a 2018.

Analisando apenas o curso de Engenharia de Produção vemos no Gráfico 3 e Gráfico 4, que este alto índice de reprovação nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear, principalmente reprovações por nota, é uma realidade de vários anos. O número de desistentes (reprovados por frequência), mesmo não sendo muito expressivo, é também um dado preocupante.

Segundo Carmo et al (2012) existe mais de um fator que colabora para os altos índices de reprovação e desistência nestas disciplinas, como por exemplo a falta de revisão dos conteúdos básicos por parte de alguns professores, fazendo com que alunos que há muito tempo concluíram o ensino médio ou que não tenham visto estes conteúdos básicos, encontram mais dificuldades na disciplina. A falta de aplicação dos assuntos abordados nas disciplinas em situações-problema vivenciados no dia a dia. Outro fator é a falta de autonomia dos alunos em seus estudos (CARMO; et al, 2012). Este último fator acontece, pois, na maioria das vezes, o aluno no Ensino Médio é mais dependente do professor, pois este tem a responsabilidade de proporcionar um entendimento mais completo e detalhado do conhecimento o que em geral não ocorre na universidade, onde o professor atua de modo semelhante a um tutor, sendo assim extremamente necessária uma atitude de iniciativa e responsabilidade do aluno diante da aprendizagem (GASPARIN; et al, 2014).

Segundo resultados levantados através da pesquisa realizada por Firmino e Siqueira (2017) com diversos cursos da área de Engenharia da Universidade Federal de Viçosa, mostra que os alunos se reconhecem como o maior responsável pelo fracasso acadêmico na área da matemática e cerca de 35% dos entrevistados, atribuem esta responsabilidade aos docentes e a Instituição (FIRMINO; SIQUEIRA, 2017). Portanto percebe-se que as causas para a reprovação e desistência dos alunos nestas disciplinas são muitas. Mas umas das principais é a falta de revisão dos conteúdos básicos e a falta de autonomia dos alunos em seus estudos.

No Gráfico 5 vemos a relação entre o número de ingressantes e o número de reprovados por nota (ou seja, são considerados apenas os alunos que não conseguiram alcançar a aprovação pelo conhecimento obtido) na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral, durante o período de 2016 a 2018.

Gráfico 5 – Ingresso x Reprovação na disciplina de CDI no curso de Engenharia de Produção

Analisando este gráfico, vemos que o número de reprovados por nota é muito grande. Em todos os semestres deste período o número médio de reprovados ficou próximo de 3/5, sendo um pouco maior que este valor. Dos 2/5 restantes, temos os alunos aprovados e os desistentes, portanto, o número dos ingressantes.

Comparando o número de ingressantes na disciplina com o número de reprovados temos que em 2016, no 1º semestre, o número de reprovados foi de 73,27%, diminuindo no 2º semestre do mesmo ano, onde o número de reprovados foi de 68,75%. Em 2017, no 1º semestre obteve-se 66,04% alunos reprovados,

diminuindo novamente no 2º semestre, onde o número de reprovados ficou em 55,55% e no 1º semestre de 2018 o número de reprovados voltou a aumentar ficando em 63,06%.

No Gráfico 6, como mostrado no Gráfico 5, apresenta o número de ingressantes em relação ao número de reprovados por nota na disciplina de Álgebra Linear durante os anos de 2016 a 2018.

Gráfico 6 - Ingresso x Reprovação na disciplina de Álgebra Linear no curso de Engenharia de Produção

Na disciplina de Álgebra Linear o número de reprovados é um pouco menor em comparação a disciplina de CDI, mas o número de matrículas nesta disciplina também é menor, por isso a fração e o percentual correspondente ao número de reprovação são proporcionalmente parecidos. Portanto, nesta disciplina a média do número de reprovados por semestre ficou em de 3/5 em relação ao número de alunos ingressantes. Dos 2/5 restantes, um pouco mais de 1/5 corresponde ao número de aprovados.

Em Álgebra Linear, o número de reprovados no 1º semestre de 2016, foi de 57,61%, aumentando no 2º semestre do mesmo ano, onde o número de reprovados foi de 70,11%. Em 2017 no 1º semestre, o número de reprovados continuou a aumentar, ficando em 76,67% alunos reprovados, mas diminuiu no 2º semestre, onde o número de reprovados ficou em 54,37% e no 1º semestre de 2018 o número de reprovados continuou diminuindo ficando em 41,58%.

Para uma compreensão mais ampla, o Gráfico 7 e o Gráfico 8 mostram, em porcentagem, a média do número de aprovados, reprovados e desistentes nessas disciplinas no período de 2016 a 2018. O Gráfico 7 mostra a média deste período, corresponde a disciplina de Cálculo Diferencial e Integral.

Gráfico 7 – Média de aprovação, reprovação e desistência durante 2016 a 2018 na disciplina de CDI no curso de Engenharia de Produção

Com este gráfico verifica-se como o número de reprovação é muito alto. Na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral, mais da metade (65,2%) dos alunos ingressantes reprovam por nota. O número de aprovação (17,1%) é pouca coisa maior que o número de desistência (14,1%).

O Gráfico 8, assim como o Gráfico 7, mostra a média do número de aprovados, reprovados e desistentes na disciplina de Álgebra Linear no período de 2016 a 2018.

Gráfico 8 – Média de aprovação, reprovação e desistência durante 2016 a 2018 da disciplina de Álgebra Linear no curso de Engenharia de Produção

Como em CDI, na disciplina de Álgebra Linear, o número de reprovados por nota também é mais da metade dos ingressantes (59,4%). O número de aprovados (22,2%) é maior que o número de desistentes (15,8%).

Estes dados mostram como a situação do ensino e aprendizagem destas disciplinas é muito agravante. Por este motivo é que se verifica a necessidade de implementar novas estratégias de ensino para diminuir esse número elevado de reprovações e evasão nessas disciplinas. Muitos autores relatam em suas pesquisas, possibilidades de cursos, monitorias, entre outros métodos, utilizados nas Universidades para tentar minimizar o número de alunos reprovados.

A UTFPR campus Medianeira possui estratégias de ensino para diminuir o número de reprovados e o número de desistentes como, por exemplo, as aulas de pré – cálculo, em que estas são realizadas em horários diferenciados para que todos os alunos interessados possam participar. Porém, por esta disciplina não ser obrigatória, poucos alunos fazem. Outra estratégia são as monitorias, que são realizadas por alunos em que os mesmos atendem em horários alternativos para auxiliar os alunos com dificuldades na resolução de listas de exercícios, esclarecimento de dúvidas (GASPARIN; et al, 2014).

Além destas estratégias, foi implantada a disciplina de CDI I a distância, a qual é disponibilizada na plataforma Moodle. O material foi elaborado por um conjunto de professores da UTFPR com objetivo de ser um material mais didático para que o aluno possa ter autonomia de estudar sozinho, além disso, na plataforma os alunos têm acesso a vídeo-aulas e links que lhe dão suporte para compreender da melhor forma possível os conceitos de CDI, esta modalidade ainda está em análise (GASPARIN; et al, 2014).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É notória a importância da disciplina de Cálculo Diferencial e Integral e da disciplina de Álgebra Linear na formação profissional do Engenheiro de Produção. Porém os altos índices de reprovação e evasão nestas disciplinas são muitos preocupantes. Mesmo com as diversas estratégias de ensino que as Universidades buscam para melhorar o ensino aprendido nessas disciplinas, essas dificuldades no aprendizado e consequentemente esses altos índices de reprovação não diminuíram com o passar dos anos.

Segundo pesquisa realizada em 2012 por Gasparin et al (2014), onde foi aplicado um questionário a fim de analisar a dificuldade dos alunos nas disciplinas de exatas nos cursos de engenharia na UTFPR - Medianeira, concluíram que os alunos possuem muitas dificuldades no aprendizado dessas disciplinas. Comparando com os dados coletados nesta pesquisa, verificou-se que essa dificuldade ainda é realidade dos cursos de engenharias da UTFPR – Medianeira, em especial no curso de Engenharia de Produção. Os dados coletados apontam que mais de 55% dos alunos matriculados nestas disciplinas reprovam por nota, além de que aproximadamente 15 % dos alunos abandonam a disciplina.

Portanto, verifica-se a possibilidade de ser desenvolvida outras estratégias de ensino para diminuir o número de alunos reprovados e desistentes nas disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e Álgebra Linear. Já vem sendo desenvolvido o curso de pré-cálculo, mas este curso não é uma disciplina da grade curricular do curso, é apenas um apoio para quem tem interesse em compreender a disciplina de cálculo. Mas por não ser uma disciplina obrigatória, a procura é pequena. Portanto, poderia ser desenvolvido algo

para incentiva-los a fazer este curso, ou implementar esta disciplina de pré cálculo como obrigatória nos cursos de engenharia. Com isso os alunos seriam obrigados a fazerem a disciplina e assim, antes de começar a disciplina de Cálculo Diferencial e Integral, o aluno já teria um conhecimento básico da disciplina.

Como em Cálculo Diferencial e Integral, poderia ser implementada uma disciplina introdutória no curso, ou ser ofertada uma disciplina externa para quem tem o interesse em compreender melhor e diminuir a dificuldade de aprendizagem na disciplina de Álgebra Linear. Investir em novas estratégias de ensino ou melhorar as que já estão sendo desenvolvidas, pode ser um dos caminhos para suprir o problema dos altos índices de reprovações nessas disciplinas.

REFERÊNCIAS

- [1] CARMO, J.R.; PANTOJA, L.N.G.; SILVA, D.A.; LOPES, J.M. Identificação dos fatores que causam o baixo desempenho em cálculo I no curso de engenharia de alimentos da Universidade Federal do Pará. Anais XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, PA, 2012.
- [2] FIRMINO, G. L.; SIQUEIRA, A. M. O. A Matemática no Ensino de Engenharia. Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Química – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Viçosa – MG. Revista The Journal of Engineering and Exact Sciences - JCEC, Vol. 03 N. 03 (2017) p. 331-345.
- [3] GASPARIN, Priscila Pigatto; Et al. O Impacto do Cálculo Diferencial e Integral nos alunos ingressantes dos Cursos de Engenharia. COBENGE, Engenharia: muitos saberes e atuações. Juiz de Fora- MG, 2014.
- [4] GÓMEZ, Magela Reny Fonticiella. Acesso e Permanência de Alunos de Engenharia da UTFPR - Câmpus Medianeira. Marília, 2015. Dissertação (Mestrado em Educação), Faculdade de Filosofia e Ciências - Universidade Estadual Paulista -- Câmpus de Marília, SP, 2015.
- [5] INEP, Censo da Educação Superior 2016: Notas Estatísticas, 2016. Inep/Ministério da Educação, 2016.
- [6] LORENZATO, S. O laboratório de ensino de Matemática na formação de professores. – 3 ed.-Campinas, SP 2010.
- [7] MACHADO, Nilson José. Epistemologia e Didática: as concepções de conhecimento e inteligência e a prática docente. 3.ed. São Paulo: Cortez, 1999. 320p. p.125.
- [8] MACHADO, S. (org). Teoria das Situações Didáticas. São Paulo : EDUC (Série Trilhas) (p.77-113), 2008.
- [9] MENONCIN, Camila; et al. Retrospectiva do Curso de Geometria Analítica e Álgebra Linear na UTFPR – Medianeira, na Modalidade EAD. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR –Medianeira – Brasil. Revista Renovação e Tecnologia. V. 01, n. 01, 2010.
- [10] PINHEIRO, N. A. M. e MORETTI, M. T. Conhecimento matemático reflexivo no ensino de cálculo diferencial e integral: uma contribuição para as discussões sobre ciência, tecnologia e sociedade. Anais do II SIPEM – simpósio Internacional de pesquisa e Educação matemática. Santos, 2003.
- [11] PEREIRA, V. M. C. Cálculo no Ensino Médio: Uma proposta para o problema da variabilidade. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática) – Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [12] RAFAEL, Rosane Cordeiro; ESCHER, Marco Antonio. Evasão, Baixo Rendimento e Reprovações em Cálculo Diferencial e Integral: Uma questão a ser discutida. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2016.
- [13] REZENDE, W. M. O Ensino de Cálculo: Dificuldades de Natureza Epistemológicas. Rio de Janeiro: UFF, 2003. p. 468, 2003.
- [14] SILVA, Rita de Cássia Carvalho. Importância da Matemática na Engenharia, 2017. Disponível em: <<http://ritaccs.pro.br/site/importancia-da-matematica-na-engenharia/>>, Acessado em: 01 set. 2018.
- [15] TEIXEIRA, Katiúscia Costa Barros; PEREIRA, Ana Carolina Costa; BARROSO, Natália Maria Cordeiro. Álgebra Linear nos cursos de Engenharia: sua importância na formação do futuro Engenheiro de Teleinformática. XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE, Gramado – RS, 2013.
- [16] UNICESUMAR. Formação de engenheiros enfrenta desafios no Brasil, 2017. Disponível em: <https://www.unicesumar.edu.br/formacao-de-engenheiros-enfrenta-desafios-no-brasil/>, Acessado em: 5 set. 2018.

Capítulo 12

Projeto pré-cálculo: Reforço matemático para os cursos de engenharia em trilhas de aprendizagem do ensino híbrido

Ubirajara Carnevale de Moraes

Vera Lucia Antonio Azevedo

Marili Moreira da Silva Vieira

Celina A. A. P. Abar

Resumo: O projeto Pré-Cálculo realizado no 1º sem/2018 teve como objetivo pesquisar metodologias inovadoras que são utilizadas em um Ambiente Virtual de Ensino e Aprendizagem gratuito. Como objetivos específicos investigou-se como as metodologias ativas como a Flipped Classroom (Sala de Aula Invertida) cria condições favoráveis ao processo de ensino e aprendizagem de conteúdos de Matemática no Ensino Superior, e, em especial, os conceitos de Pré-Cálculo necessários ao desenvolvimento do componente curricular de Cálculo Diferencial e Integral I nos cursos de Engenharia e Exatas. Com trilhas de aprendizagem no Ambiente Virtual contendo roteiros, exercícios, vídeos, atividades e gabaritos, a sala de aula invertida exigiu dos alunos uma postura ativa e protagonista no processo de estudo. Como parceiro do professor, o aluno assumiu uma responsabilidade em seu aprendizado, respeitado seu tempo, conhecimento e habilidades pessoais, garantindo a personalização do ensino, onde o Ambiente Virtual permitia que ele avançasse de acordo com seu aproveitamento. Os encontros presenciais com o professor não eram mais aulas expositivas, mas sim espaços de reflexão para discutir os conteúdos vistos e explorados no Ambiente Virtual e que agora poderiam ser trabalhados de forma diferente e focada nas dificuldades encontradas e no aprofundamento de conceitos e futuros conteúdos. Os resultados positivos obtidos mostraram que os alunos participantes do projeto apresentaram melhoras em seu desempenho na disciplina em questão. As Trilhas de Aprendizagem, resultado de uma arquitetura cognitiva do professor, poderão ser construídas também com os demais componentes curriculares do currículo da Graduação.

Palavras-chave: Ensino Híbrido. Ambiente Virtual. Pré-Cálculo.

1 INTRODUÇÃO

A disciplina de Cálculo Integral e Diferencial é considerada uma das mais difíceis nos cursos superiores da área de Exatas. Um dos motivos para isso é a dificuldade inerente ao conceito de Cálculo. Estes conceitos foram construídos ao longo da trajetória matemática nos Ensinos Fundamental e Médio e precisam ser resgatados para o bom desempenho no Ensino Superior. Por esse motivo a compreensão destes conceitos não costuma ser de fácil assimilação pelos estudantes. Outra razão para isso é a forma como estes conteúdos são ensinados, visto que, em muitos casos, são repassados aos estudantes de forma mecânica e estes não compreendem a aplicabilidade de tal conteúdo.

Segundo Irias, Vieira, Miranda e Silva (2011), após análise das dificuldades dos alunos, observa-se que as mesmas se devem, em grande parte, por causa da falta de tempo para se dedicar à disciplina em sala de aula. Assim, acredita-se que uma possível solução para reduzir as reprovações dos alunos na disciplina de Cálculo I seria a utilização de um método diferenciado, afim de que o mesmo supra a indisponibilidade dos alunos para se dedicar integralmente à disciplina na tentativa de melhorar o seu desempenho. Como possíveis soluções temos: a adequação que possa contribuir para uma qualidade e eficiência na formação básica em Matemática no ensino Fundamental e Médio dos alunos e as possibilidades de capacitação e formação para os professores de Cálculo, investigando novas práticas e recursos didáticos.

Em geral, para Silva, Aquino, Cavalcante, Macedo e Macedo (2010), a disciplina de Cálculo Diferencial e Integral contempla, amplamente, as necessidades dos cursos de Engenharia, tecnológicos e licenciaturas nas áreas de Ciências da Natureza dentre outros. Percebe-se a necessidade e a importância que ela possui para a formação dos alunos desses cursos. A aprendizagem dessa disciplina possibilitará, futuramente, a realização de tarefas de grande complexidade e facilitará a assimilação de outros conteúdos.

A natureza das dificuldades encontradas no Cálculo é, em sua maioria, comum às relacionadas à abstração da Matemática, necessidade de conhecimentos prévios para o desenvolvimento do processo matemático, formação do professor e formação do aluno que chega à Universidade muitas vezes com falhas do Ensino Básico. Estas são as causas mais comumente citadas na literatura científica que estuda as dificuldades de aprendizagem dessa disciplina.

Muitos professores utilizam um Ambiente Virtual como um repositório, ou simplesmente um meio de cobrar e receber tarefas do curso, e, às vezes, utilizam as ferramentas de comunicação como fórum e chat para discutir assuntos, porém, faz-se necessário pesquisar novas formas para utilizar o AVA com o ensino presencial para um processo educacional motivador e eficiente.

Diante desta possibilidade de uso dos Ambientes Virtuais de Aprendizagem que oferecem inúmeras vantagens como recursos tecnológicos, o acervo da Internet, a comunicação/interação com o professor e seus colegas a qualquer momento e ainda o crescente interesse do aluno do Século XXI pela Tecnologia, temos a seguinte questão: como um AVA pode ser associado ao processo educacional no ensino do Cálculo, utilizando novos métodos de ensino e aprendizagem?

2. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo geral, pesquisar metodologias ativas como o Ensino Híbrido, e em especial a Sala de Aula Invertida, que podem ser aplicadas aos conteúdos de Matemática no Ensino Superior e com o uso de Ambientes Virtuais.

Como objetivos específicos, o presente estudo investigou como tais modelos inovadores podem envolver o ensino presencial e o online em seu Ambiente Virtual, além de identificar as estratégias utilizadas para criar condições favoráveis ao processo de ensino e aprendizagem de alguns conteúdos de Matemática necessários para o Cálculo Diferencial e Integral I.

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de conhecer mais a fundo, as metodologias inovadoras do Ensino Híbrido, em especial a “sala de aula invertida” para a realização deste projeto de pesquisa e considerando as experiências vivenciadas ao longo da vida profissional dos autores no campo da Educação, Informática, Matemática e da Tecnologia Educacional, bem como na docência universitária, intimamente ligada a recursos tecnológicos, deu-se início ao trabalho de pesquisa, seguindo os passos citados por Luckesi et al. (2011): levantamento bibliográfico, seleção de livros e sites, e a leitura para documentação.

A pesquisa bibliográfica foi realizada sobre o levantamento de referências teóricas já publicadas em meio escrito ou eletrônico.

Além da pesquisa bibliográfica tradicional, também foi utilizado como campo da pesquisa o Ambiente Virtual Moodle, bem como o acervo eletrônico que ele abriga em suas páginas e links. Também foi explorado o acervo da Biblioteca Virtual da Universidade, na busca de materiais de qualidade envolvendo o Cálculo, a serem oferecidos aos alunos participantes do projeto.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 AMBIENTE VIRTUAL DE ENSINO E APRENDIZAGEM (AVA)

Os ambientes informatizados que permitem a gestão e a realização de cursos a distância são chamados de Ambientes Virtuais de Aprendizagem (AVA). Esses tipos de ambientes oferecem aos gestores todos os recursos necessários para a confecção e implementação de cursos.

Segundo Santos e Okada, os ambientes virtuais de aprendizagem correspondem ao conjunto de elementos técnicos e principalmente humanos e seu feixe de relações contido no ciberespaço (Internet) com uma identidade e um contexto específico criados com a intenção clara do aprendizado. (Santos e Okada, 2003).

Existem diferentes tipos de AVA no ciberespaço. Cada um tem suas vantagens e diferentes características de uso. Alguns ambientes geram custos elevados de aquisição e outros são de domínio público, ou seja, são gratuitos.

Um exemplo de AVA gratuito com grande aceitação mundial e que permite a sua customização é o AVA Moodle.

A grande vantagem no AVA Moodle, além das características técnicas, é a possibilidade de modelar as atividades de acordo com o público alvo e as características do curso que se pretende ministrar, além de funcionar como gestor de conteúdo, permitindo disponibilizar o material didático e tarefas de forma dinâmica, atrativa e inovadora.

O Moodle permite modelar um ambiente virtual de apoio ao ensino e à aprendizagem. Sua aplicação pode estender a atuação do professor para além da sala de aula presencial e do horário escolar e permite a ele usar sua criatividade e capacidade em construir um espaço adequado para a realização de seu curso.

No ensino presencial, o contato físico e o uso dos sentidos geram uma situação diferente do que a verificada no ensino online. Nele, é de fundamental importância que a separação física entre professor e alunos, durante a maior parte do tempo, seja amenizada de forma a criar um ambiente agradável, interativo e estimulante.

Neste projeto foi utilizado o Ambiente Virtual Moodle customizado com recursos digitais como vídeos e links e acesso à Biblioteca Virtual da Universidade.

4.2 ENSINO HÍBRIDO

Na educação tradicional, encontramos um ambiente controlado, com tempo regular e constante supervisão dos professores. Há interação entre os alunos. Sem dúvida temos excelentes práticas de sala de aula, porém nem sempre são absorvidas igualmente e de forma eficiente por cada aluno.

Há uma preocupação necessária em atingir de forma eficaz o aluno, dando-lhe responsabilidade e autonomia, suprimindo assim suas necessidades pessoais para o acompanhamento do conteúdo escolar.

Segundo Paulo Freire (1996, p.12) “ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção”.

O aprendizado do aluno é despertado para o conhecimento quando ele é levado a compreender o que ocorre ao seu redor e fazer suas próprias conexões que fazem sentido à sua vida e realidade. Por isso é muito importante que o educador reveja as propostas desenvolvidas em sala de aula, permitindo a oportunidade do aluno em participar ativamente de sua construção do conhecimento. Segundo Moran (2007, p.33) “o papel do educador é mobilizar o desejo de aprender para que o aluno se sinta sempre com vontade de conhecer mais”.

Criar situações em que ele assuma ativamente o seu papel nesse processo educacional, permite uma nova forma de ensinar para o professor e de aprender para o aluno.

Uma das estratégias utilizadas é provocar o protagonismo dos alunos com a utilização da tecnologia. Prado (2001) afirma que o papel da tecnologia pode ser um aliado extremamente importante, justamente porque demanda novas formas de interpretar e representar o conhecimento.

Devemos usar a tecnologia estrategicamente, ou seja, tendo claro sua finalidade, abrangência e eficiência. Christensen, Horn & Johnson (2009) afirmam que a utilização das tecnologias deve ganhar espaço em sala de aula quando essa for de fato a melhor alternativa para o aluno aprender.

O professor pode fazer isso, quando planeja, organiza e usufrui dos recursos digitais e eletrônicos para criar novos espaços de convivência pedagógica com seus alunos.

Segundo Bacich e Moran (2018), os alunos tem grande facilidade de acesso à informação, participando de redes sociais e colaborativas com pessoas com as quais compartilham conhecimentos, valores, práticas e descobertas.

Para Moran (2018, p. 2), “aprendemos quando alguém mais experiente nos fala e aprendemos quando descobrimos a partir de um envolvimento mais direto por questionamento e experimentação”.

Essa descoberta desenvolvida a partir de métodos ativos e criativos, centrados na atividade, propiciam uma aprendizagem por metodologias ativas.

Moran (2018) ainda ratifica que a metodologia ativa de ensino, nada mais é, do que uma

metodologia de ensino centrada na aprendizagem pela experiência e no desenvolvimento do aprendiz. Para ele, “Nos últimos anos, tem havido uma ênfase em combinar metodologias ativas em contextos híbridos que unam as vantagens das metodologias indutivas e das dedutivas”.

Com isso, surgiu uma nova proposta para conduzir o aluno no processo educacional, o Blended Learning.

No Blended Learning ou Ensino Híbrido alterna-se momentos em que o aluno estuda sozinho no Ambiente Virtual de Aprendizagem e em grupo, interagindo com seus colegas e professores. Com isso temos uma integração entre atividades tradicionais em sala de aula com atividades online no AVA com a ressalva que o aluno controla seu lugar, tempo e ritmo de sua aprendizagem.

Tori (2009) refere-se ao Ensino Híbrido como dois ambientes de aprendizagem que historicamente se desenvolveram de maneira separada, a tradicional sala de aula presencial e o moderno Ambiente Virtual de Aprendizagem, e que vêm se descobrindo mutuamente complementares. O resultado desse encontro são cursos híbridos que procuram aproveitar o que há de vantajoso em cada modalidade, considerando contexto, custo, adequação pedagógica, objetivos educacionais e perfis dos alunos.

Tori (2010, p.20), ainda afirma que há uma tendência em “convergir a aprendizagem eletrônica e convencional, rumo a uma coexistência harmoniosa entre presencial e virtual, em variadas proporções, na educação do futuro”.

De acordo com Christensen, Horn & Johnson (2009), o Ensino Híbrido está emergindo como uma inovação sustentada em relação à sala de aula tradicional. Esta forma híbrida é uma tentativa de oferecer “o melhor de dois mundos” — isto é, as vantagens da educação online combinadas com todos os benefícios da sala de aula tradicional.

Neste projeto, foi utilizado o modelo de Rotação, que por sua vez, apresenta quatro submodelos: Rotação por estações, Laboratório rotacional, Sala de aula invertida e Rotação individual. Foi aplicado o submodelo de Sala de aula invertida, foco principal da pesquisa, pois foi considerado mais adequados para o projeto.

A presença da educação online, bem como de tecnologias digitais não irá reduzir a importância do professor no contexto escolar, apenas irá modificar sua atuação, já que o professor, com seus instrumentos analógicos e digitais, poderá promover discussões e reflexões, estimulando o protagonismo dos alunos que aprendem e ensinam uns aos outros.

Mas para isso, é necessário que haja no Ensino Híbrido uma análise da situação para a elaboração do planejamento das atividades.

As tecnologias necessárias podem ser escolhidas pelo professor com objetivos pedagógicos bem definidos e no momento oportuno. Deverá também ser definido o papel do aluno e do professor, pois durante a realização de uma atividade, o professor pode reservar seu tempo para atender aqueles alunos com maior dificuldade, enquanto os outros mais adiantados, seguem com a atividade proposta. É a personalização do ensino na prática.

Alunos com problemas de aprendizagem ou defasados por conteúdos escolares anteriores precisam de uma atenção especial, principalmente por ainda não terem alcançado sua autonomia no processo de aprendizagem. Seguramente, para os alunos que já dominam os conteúdos básicos, tem mais autonomia e controle sobre a situação, podendo seguir adiante.

Justamente, para atender essa demanda de supervisionar os alunos com maior dificuldade e permitir aos demais que deem andamento ao processo educacional, ou ainda enriquecer o conteúdo a ser ministrado, que o professor que pretende usar o Ensino Híbrido, precisará desenvolver um planejamento eficiente envolvendo estrategicamente a tecnologia.

Em função dos objetivos da aula ou curso, o professor pode: definir seu papel e o do aluno; selecionar vídeos na Internet, adquirir pacotes ou criá-los à sua necessidade; selecionar materiais eletrônicos disponíveis em sites confiáveis; escolher as ferramentas digitais necessárias; realizar a modelagem do Ambiente Virtual atendendo as necessidades da disciplina; elaborar atividades e avaliações sobre o conteúdo programático trabalhado; escolher espaços diferenciados, salas ambientes ou mesmo a sala de aula tradicional.

5. O PROJETO

Para implementação e desenvolvimento do projeto foram realizadas algumas fases que atendem a metodologia do Ensino Híbrido.

Foi organizado um planejamento em conjunto com a professora de Cálculo Diferencial e Integral I e adaptado ao modelo do Ensino Híbrido.

Uma equipe foi organizada com a coordenadora de Matemática da Universidade Presbiteriana Mackenzie, uma pedagoga, um professor especialista no uso educacional do Ambiente Virtual Moodle. Todos participaram de reuniões prévias ao início do projeto e uma capacitação sobre a metodologia flipped classroom (sala de aula invertida) do Ensino Híbrido foi apresentada e discutida. Além disso, também foram analisados os conteúdos de Matemática a serem explorados pelos alunos ao longo do projeto e a professora de Matemática ficou responsável em elaborar as atividades que seriam realizadas nos encontros presenciais. Os conteúdos matemáticos que foram explorados no projeto foram: Conjuntos numéricos e regras de potenciação; Produtos notáveis e fatoração; Equação e inequação; Funções e representação gráfica; Funções Exponenciais e logarítmicas; Trigonometria; Transformação trigonométrica; Matrizes e Determinantes, e Sistemas lineares.

A intenção foi fortalecer esses conceitos que seriam aplicados nas aulas de Cálculo e nas disciplinas seguintes à essa disciplina na estrutura curricular dos cursos.

Todos os alunos ingressantes no 1º. Semestre de 2018 nos cursos de Engenharia, Sistemas de Informação, Ciência da Computação, Administração, Economia, Ciências Contábeis e Comércio Exterior nos quais a disciplina Cálculo Diferencial e Integral I é ministrada no 1º. Semestre tiveram acesso ao acervo do projeto. Esse contingente foi cadastrado automaticamente no Ambiente Virtual Moodle da Universidade Presbiteriana Mackenzie, facilitando seu acesso ao projeto.

O curso no ambiente Moodle (Figura 1) foi estruturado para dez semanas e organizados em abas do Ambiente Virtual para facilitar a localização por parte dos alunos.

Figura 1: Ambiente Virtual Moodle do Projeto – Abas com temas da Matemática

Fonte: screenshot do Ambiente Virtual do autor

A orientação sobre a metodologia de “sala de aula invertida”, ou seja, como os alunos deveriam proceder durante o projeto, também foi disponibilizada no Moodle por intermédio de um vídeo educativo. O aluno é

convidado a acessar o Ambiente Virtual na semana anterior ao projeto para uma ambientação e acolhimento.

O projeto contém quatro etapas a cada semana:

- a) Trilha de Aprendizagem no Ambiente Virtual, ocasião onde ocorre a Interação previa com materiais didáticos (vídeos, leituras, exercícios resolvidos etc), conteúdos e atividades (exercícios e gabaritos) no Ambiente Virtual Moodle;
- b) Encontro presencial com a professora de Matemática (Figura 2) para discussões e aprofundamento dos estudos e conhecimentos adquiridos a partir da interação com os materiais didáticos do item a;
- c) Atividades pós-encontro para auto estudo e verificação de sua aprendizagem (exercícios de revisão, desafios, entre outros);
- d) Correção dos exercícios, permitindo que todos os alunos dirimissem suas dúvidas. Neste momento, os alunos com maior dificuldade poderiam ser atendidos individualmente, permitindo que todos sigam para a semana seguinte com poucas ou nenhuma dúvida.

Figura 2: Horários do encontro presencial com a professora (etapas b,c,d)

Fonte: screenshot do Ambiente Virtual do autor

O início das atividades do projeto foi dado por intermédio de uma mensagem enviada a todos os alunos participantes, informando a primeira tarefa: acessar o Ambiente Virtual e acessar a aba de conteúdo “Aula 1 – Conjuntos e grupos numéricos e regras de potenciação” (Figura 1). O conteúdo da aba traz todas as atividades que o aluno fará sozinho, distante da Escola. Para isso o professor, já organizou os estudos que o aluno deverá seguir.

O professor aqui assume o papel de um arquiteto cognitivo, já que pesquisa as fontes do material necessário ao aluno, planeja as atividades, organizando passo a passo o que o aluno irá fazer. Para que tudo fique claro e definido ao aluno, permitindo a flexibilização do local e horário onde ele irá realizar as tarefas, foi criada uma trilha de aprendizagem.

O objetivo aqui foi garantir que o aluno encontrasse no ambiente virtual um roteiro pormenorizado do que devia fazer antes do encontro presencial. A trilha de aprendizagem (Figura 3) tem a sequência necessária que o aluno deverá seguir para participar da aula de acordo com a metodologia da Sala de Aula Invertida.

Fig. 3 – Trilha de Aprendizagem para a sala de aula invertida

Fonte: screenshot do Ambiente Virtual do autor

A trilha de aprendizagem foi construída com ícones que indicam a tarefa a ser realizada pelo aluno: assistir um vídeo, fazer a leitura do e-book, estudar exercícios resolvidos, resolver exercícios propostos, enfim ações necessárias, idealizadas pelo professor, para que o aluno seja capaz de trabalhar o conteúdo sem a presença física do professor. Justamente essa foi a função da trilha de aprendizagem, estruturar as atividades a serem realizadas pelo aluno, fornecendo-lhe subsídios para participar de forma individual e autônoma. As trilhas ainda trazem a possibilidade de o aluno avançar nas estações da trilha em sua velocidade pessoal, ou seja, o aluno caminhará e poderá voltar se não estiver confortável para seguir adiante e completar toda a trilha.

As trilhas de aprendizagem poderão variar de conteúdo para conteúdo, de semana para semana, em função da complexidade e dos recursos a serem usados em determinada aula. Um conteúdo que exige um número maior de atividades apresentará uma trilha de aprendizagem com maior detalhamento (figura 4), porém mantendo a mesma iconografia para facilitar o acompanhamento dos alunos.

Fig. 4 – Trilha de Aprendizagem para a sala de aula invertida

Fonte: screenshot do Ambiente Virtual do projeto

Para garantir que a trilha seja realmente proveitosa para os alunos com exercícios e tarefas correlatas à aula da semana, foram disponibilizados semanalmente em cada aba, os gabaritos dos exercícios.

Com a realização das trilhas, o aluno segue para o encontro presencial com a professora para discussão, reflexão e tirar dúvidas. Não se trata de uma aula expositiva, mas um espaço que integra aplicações do conteúdo aprendido nos vídeos, reflexões e discussões sobre os conceitos. É também um momento para os alunos dividirem seus conhecimentos com seus pares, demonstrando colaboração entre os participantes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta do projeto foi muito bem recebida pelos alunos que em um primeiro momento se interessaram pela metodologia da “sala de aula invertida” que se configura por uma postura, a ser adotada nos encontros presenciais, diferente da prática docente tradicional.

Os alunos que vinham aos encontros presenciais sem ter assistido o vídeo para a realização das atividades, recorreram a mais um recurso do Ambiente Virtual que o aplicativo Moodle Mobile que permite o acesso de todo o acervo do Ambiente Virtual no celular ou tablete. Alguns assistiram o vídeo da semana ou consultavam exercícios resolvidos a caminho da escola ou antes do encontro presencial.

Com a aplicação da “sala aula invertida” na prática, onde os alunos tinham um contato preliminar com o conteúdo teórico, sem a aula expositiva/presencial, foi assumida uma postura diferente tanto para o professor, como para os alunos, já que a atuação do professor passou a discussão do tema da aula, tirar dúvidas e criar situações de forma que os alunos teriam que aplicar depois, os conceitos vistos nos vídeos e nas atividades desenvolvidas antes do encontro presencial.

Os alunos participantes do projeto passaram a utilizar a metodologia vivenciada (trilha de aprendizagem com vídeos e estudo prévio) com outras disciplinas de sua grade curricular, criando sua própria trilha de aprendizagem. Um desfecho interessante, já que o Ensino Híbrido busca a personalização do ensino.

Ao final do projeto, alguns alunos haviam desistido da participação. Um dos motivos foi o acúmulo de atividades acadêmicas, pois precisavam dar prioridade para suas disciplinas do currículo oficial da Faculdade. Outra situação, foi a preferência em participar de aulas tradicionais, copiando da lousa para seu caderno e depender totalmente da aula expositiva do professor.

Também concluímos que essa metodologia só poderá ser implantada com algumas premissas: professores devidamente capacitados e que acreditam na eficácia da inversão da aula. E alunos, também capacitados, no uso do Ambiente Virtual, e que tenham conscientização de que precisam assumir a responsabilidade na obtenção do conhecimento.

REFERÊNCIAS

- [1] BACICH, L.; MORAN, J. Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico prática. Porto Alegre: Penso, 2018.
- [2] CHRISTENSEN, C., Horn, M. & Johnson, C. Inovação na sala de aula: como a inovação disruptiva muda a forma de aprender. Porto Alegre: Artmed, 2009.
- [3] FREIRE, P. Pedagogia da Autonomia - Saberes necessária à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.
- [4] IRIAS, D. F.; Vieira, J. P., MIRANDA, P. R.; SILVA, R. C. Cálculo Diferencial e Integral I: Analisando as dificuldades dos alunos de um curso de Licenciatura em Matemática. Disponível em: <<http://www.cead.ufop.br/jornal/index.php/redumat/article/view/343>>. Acesso em 2 maio 2018.
- [5] LUCKESI, C.; BARRETO, E.; Cosma, J.; BAPTISTA, N. Fazer Universidade: uma proposta metodológica. 17 ed. São Paulo: Cortez, 2011
- [6] MORAN, J. M. A educação que desejamos: novos desafios e como chegar lá. Campinas, SP: Papirus, 2007.
- [7] PRADO, M. E. B. B. Articulando saberes e transformando a prática. Disponível em: <http://eadconsultoria.com.br/matapoio/biblioteca/textos_pdf/texto23.pdf>. Acesso em: 2 maio 2018.
- [8] SANTOS, E. O.; OKADA, A. L. P. (2003). A construção de ambientes virtuais de aprendizagem: por autorias plurais e gratuitas no ciberespaço. Disponível em: <<http://www.comunidadesvirtuais.pro.br/hipertexto/home/ava.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2018.
- [9] SILVA, M. A. et al. Dificuldades de aprendizagem na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral: estudo de caso com alunos do curso de licenciatura em Química. Disponível em: <<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1617/882>>. Acesso em: 21 abr. 2018.
- [10] TORI, R. Cursos híbridos ou blended learning. En Litto, F. M. ; Formiga, M. M. M. (Orgs.). Educação a Distância: o estado da arte. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.
- [11] TORI, R. Educação sem distância: as tecnologias interativas na redução de distâncias em ensino e aprendizagem. São Paulo: Senac, 2010.

Capítulo 13

Estudo do óleo de mamona como aditivo em banhos de eletrodeposição de Zn

João Vitor Rego Muniz

Maria Eliziane Pires de Souza

Jhonatan Peres de Sousa

Resumo: Este trabalho parte da problemática da corrosão e desgastes em materiais metálicos, empregando-se a técnica de eletrodeposição, a peça passou por um banho eletrolítico em solução de sulfato de zinco e fosfato de sódio, tendo sobre controle parâmetros de pH, corrente e concentração da solução. Após isso, foi obtido resultado satisfatório ao depositar uma fina camada de zinco como revestimento do material. A adição do óleo de mamona ao banho de eletrodeposição resultou em melhorias nos aspectos físico químicos, como brilho, porosidade e resistência à corrosão, além disso trata-se de um aditivo menos nocivo ao meio ambiente, podendo ser chamado de inibidor verde. Na segunda parte do trabalho foi feita a caracterização eletroquímica levando em consideração sua resistência a corrosão. Ao término dos experimentos obtivemos o cumprimento satisfatório do objetivo científico e acadêmico.

Palavras-chave: Corrosão. Eletrodeposição. Óleo de Mamona.

1 INTRODUÇÃO

O aço AISI 1020 está entre os aços de baixo teor de carbono em sua composição, aproximadamente 0,25 %p C, possui baixa dureza e baixa resistência, mas, boa ductibilidade e tenacidade, sendo, portanto usinável e soldável [1]. Essas características garantem a este material larga utilização na indústria metal mecânica, como estruturas metálicas, tubos e chapas. Porém, problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades como na indústria naval, construção civil e em obras de artes, o que implica em perdas econômicas, contaminação de produtos e fatores de segurança. Diante desta problemática, os revestimentos metálicos são usados com diferentes finalidades como decorativo, resistência ao atrito e resistência à corrosão [1-2].

A eletrodeposição é um processo muito utilizado na indústria para a obtenção de revestimentos metálicos para as mais diferentes aplicações, pois se consegue um revestimento muito fino e relativamente livre de poros. Neste processo, o metal que se deseja proteger é colocado como catodo, onde o eletrólito contém o sal do metal a ser revertido. É economicamente importante porque se consegue proteção adequada com camadas bem finas, evitando excesso de deposição de metais caros. O zinco é largamente aplicado para este fim, sendo utilizado na proteção de aços e materiais ferrosos contra corrosão. No entanto, os revestimentos de zinco podem ser corroídos rapidamente, dependendo das condições de operação e da adição ou não de aditivos que visam aprimorar a eficiência deste processo [3-4]. A espessura e propriedades da película dependem da densidade de corrente, concentração do sal, presença de aditivos e natureza do metal de base [1].

Os aditivos são compostos que contêm em sua composição nitrogênio, enxofre e oxigênio, que formam grupos funcionais como amino, carboxila e hidroxila. Seu emprego no processo de eletrodeposição irá influenciar no crescimento e na estrutura dos eletrodepósitos, tendo como principais benefícios o aspecto brilhante da superfície depositada, redução do tamanho dos grãos, nivelamento do filme e redução da corrosão. Dentre os aditivos mais empregados destacam-se os orgânicos, com larga aplicação industrial, como a gelatina, glicerol, manitol e sorbitol [5].

Os óleos vegetais são importantes fontes renováveis de matéria-prima para a indústria, pois além de oferecerem a possibilidade de um grande número de modificações estruturais, são materiais diversificados e de baixo custo [6]. Nessa conjuntura, está o óleo de mamona, também chamado de óleo de rícino, pois é obtido da semente da planta “*Ricinus Communis*” que é encontrada em regiões tropicais, sendo muito abundante no Brasil. É um líquido viscoso, obtido pela compressão das sementes ou por extração com solvente [6]. Sua aplicabilidade é conhecida desde a era colonial, onde era usado para lubrificar os engenhos de cana-de-açúcar. Atualmente, o óleo de mamona tem sido extensivamente utilizado para fins industriais, devido às suas características físico-químicas, uma vez que suporta grandes e bruscas variações de temperatura, além de utilizado na fabricação de cosméticos e na indústria de medicamentos. Este óleo apresenta elevada resistência à hidrólise, devido às suas longas cadeias hidrófobas, por isso a importância de estudar a viabilidade de sua aplicação como aditivo de banhos de eletrodeposição [7]. O principal constituinte do óleo de mamona é o triacilglicerol do ácido ricinoléico, um ácido graxo incomum, que apresenta 18 carbonos na sua estrutura, com uma insaturação cis no carbono 9 e uma hidroxila no carbono 12, como é mostrado na Figura 1 [8].

Figura 1: Ligações químicas do óleo de mamona [8].

Este trabalho busca fazer um estudo sobre a utilização do óleo de mamona como aditivo em banhos de eletrodeposição, a escolha deste óleo pode ser justificada por se tratar de uma opção ambientalmente

favorável, além de corroborar com outros trabalhos que fazem diferentes estudos sobre o emprego industrial deste óleo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras utilizadas eram de aço carbono ABNT 1020, com área de 2,27 cm², ambas as superfícies foram lixadas com o objetivo de retirar imperfeições que interferissem na qualidade e uniformidade do filme. O fio de contato utilizado no ensaio de eletrodeposição foi soldado em uma das superfícies da amostra e coberto com fita de eletrodeposição para evitar infiltração durante o ensaio, Figura 2a. Em seguida, as amostras foram embutidas com resina a frio e por fim foram polidas até a lixa 1200, de forma que a superfície ficasse sem riscos ou arranhões, como é observado na Figura 2b. As amostras foram numeradas e pesadas, para que após a eletrodeposição fossem novamente pesadas e mensurado o peso do filme formado.

Figura 2: a) Amostra com fio elétrico e embutida. b) Amostra após polimento.

2.2 ENSAIO DE ELETRODEPOSIÇÃO

A eletrodeposição foi realizada utilizando uma fonte de corrente contínua (POWERBRAS) que alimentava o sistema montado como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Montagem do experimento de eletrodeposição.

Nos ensaios iniciais foi utilizada uma placa de platina observada na Figura 4a, como contra eletrodo, contudo foi observado que durante o experimento a placa não possuía um posicionamento satisfatório de forma que ocasionava a formação de um filme irregular, sendo assim, substituiu-se a platina por um béquer de aço inoxidável que garantiu um filme igual por toda a superfície da amostra. O béquer exercia a função de ânodo ligada ao polo positivo e a amostra de cátodo, no polo negativo. A solução empregada foi ZnSO_4 (2 g/l), em 300 ml de água destilada. O óleo de mamona foi adicionado em três concentrações 0,28 g/L, de 2 g/L e 2,8 g/L. O pH da solução foi ajustado para 3, por meio da adição de H_2SO_4 (1 M).

Figura 4: a) Experimento inicial com placa de platina e solução de ZnSO_4 (0,1M) e Na_2HPO_4 (0,2M).
b) Modelo montado com béquer de aço.

Antes da eletrodeposição as amostras foram decapadas por 5 minutos em ácido sulfúrico a 1 M. As condições da eletrodeposição foram: 5 minutos a uma corrente de 0,2 A e tensão de 0,09 V, em seguida a fonte foi desligada por 1 minuto, sendo novamente aplicada uma corrente de 0,5 A à tensão de 0,12 V, sob constante agitação. Dessa forma, os valores de densidade de corrente ficaram próximos de 22,7 A/dm², valores estes que podem ser comparados com o estudo de Tomachuk [9], que apresenta densidades de corrente próximas. A amostra foi lavada e pesada ao término do experimento.

2.3 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Os ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram realizados em um aparelho Potenciostato fabricado pela empresa Autolab, modelo PGSTAT 302N, e os resultados foram obtidos pelo software Nova, versão 2.1. A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) é a principal técnica eletroquímica onde é aplicado um potencial de corrente alternada com diferentes valores de frequência, assim possibilita estudar reações de corrosão e medir taxas de corrosão em meios de baixa condutividade [10]. Já a técnica de polarização potenciodinâmica, consiste na aplicação de pequenas variações de potencial para que se obtenham respostas em corrente o mais linear possível, para assim medir a resistência a corrosão de um material e a velocidade do processo [6]. Os ensaios eletroquímicos foram realizados em uma célula de vidro, com o eletrodo de trabalho (amostra que passou por eletrodeposição), o contra eletrodo de platina e de eletrodo de referência de Ag/AgCl como observado na Figura 5.

Figura 5: Montagem do sistema para ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em eletrólito de NaCl 0,1 M. Antes da realização de ambos experimentos foi medido o potencial a circuito aberto (OCP). A EIE foi realizada na faixa de frequência 105 e 10-2 Hz e amplitude de 10 mV. O ensaio de polarização foi realizado variando o potencial de -100 mV a +100 mV em relação ao potencial de circuito aberto, com uma taxa de varredura de 0,01 mV/s.

3 RESULTADOS

As amostras foram pesadas antes e após a eletrodeposição, e os valores obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Peso das amostras antes e após a eletrodeposição

Amostra	Concentração do óleo de mamona (g/L)	Peso antes da eletrodeposição (g)	Peso após eletrodeposição (g)	Peso experimental do filme (g)
1	0,98	46,861	46,878	0,017
2	2,00	47,305	47,313	0,008
3	2,08	46,148	46,150	0,002
Sem aditivo	-	47,816	47,819	0,003

Com esses resultados, é possível concluir que a menor concentração do óleo influenciou na deposição de zinco no filme, apresentando maior peso do filme (17 mg). No aspecto visual do filme, foi possível

observar a formação do recobrimento mais uniforme quando se adicionava o óleo de mamona, iniciando a deposição da parte mais externa para o centro, fato este diferente de ensaios realizados anteriormente sem a adição do aditivo, onde o filme apresentava características não uniformes e se depositava primeiramente no centro da amostra, como observamos na imagem 6-a. Também é notória a formação de alguns glóbulos no filme com o aditivo, como é observado na figura 6-b.

Figura 6: Superfície da amostra com aditivo

Na figura 7, observamos os gráficos Bode modulus e phase, onde nas imagens 7-a é notório o deslocamento no gráfico que a presença do zinco ocasiona, se concentrando na primeira parte do gráfico a curva da amostra sem filme, ficando claro a presença apenas do ferro sem recobrimento.

Figura 7: a) gráfico Bode Phase. b) gráfico Bode Modulus.

Figura 8: Resultados de Polarização Potenciodinâmica

Na figura 8 são apresentados os resultados dos ensaios de polarização potenciodinâmica. Como pode ser observado no gráfico, a menor concentração do óleo de mamona resulta em um revestimento com um potencial de corrosão mais positivo, sendo que há também uma diminuição na densidade de corrente de corrosão, ou seja, o revestimento obtido com a concentração de 2g/L do óleo de mamona resulta em um comportamento mais interessante em termos de corrosão.

Tabela 1: Valores obtidos pelo método de Tafel

Concentração do aditivo	j _{corr} (A/cm ²)	i _{corr} (A)	Taxa de corrosão (mm/ano)	Resistência a polarização (Ω)
0,93 g/L	2,151x10 ⁻⁵	4,8827 x10 ⁻⁵	0,2499	485,85
2,00 g/L	1,988x10 ⁻⁵	4,5147 x10 ⁻⁵	0,2311	800,29
2,80 g/L	1,824x10 ⁻⁵	4,1411x10 ⁻⁵	0,2122	236,53
Sem aditivo	7,734x10 ⁻⁵	7,7342 x10 ⁻⁵	0,8998	180,32
Sem filme	1,469 x10 ⁻⁵	3,3142x10 ⁻⁵	0,1698	949,97

Na tabela 2, são apresentados valores de corrente, densidade de corrente, taxa de corrosão e resistência a polarização, que foram obtidos utilizando o método de extrapolação de Tafel. [10-11]

4 CONCLUSÕES

A aplicação do óleo de mamona resultou em revestimentos com características interessantes nesses estudos preliminares, já que apenas uma solução foi empregada como fonte de zinco. Os resultados dos ensaios eletroquímicos mostraram que o óleo de mamona apresenta bom resultado como aditivo da eletrodeposição para controle de corrosão aplicado sobre aço ABNT 1020. A partir dos resultados pode ser concluído que os melhores resultados de controle de corrosão foi com a amostra que possuía menor concentração do óleo de mamona. Além disso, a presença do óleo de mamona melhorou a aparência dos revestimentos contribuindo de forma satisfatória no banho de eletrodeposição.

Outras soluções devem ser empregadas bem como outros parâmetros de processo de eletrodeposição a fim de melhor compreender a função do óleo de mamona na formação do filme eletrodepositado.

REFERÊNCIAS

- [1] JESUS, Michele David de. Efeito do glicerol como aditivo para resistência à corrosão do revestimento de zinco obtido através de eletrodeposição. 2016.
- [2] GENTIL, Vicente. Corrosão. 3a edição. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora SA, 1996.
- [3] OLIVEIRA, José Anderson et al. Avaliação das propriedades da liga Zn-Ni-Fe obtida por eletrodeposição. 2016.
- [4] PECEQUILO, Cristiane Vargas; PANOSSIAN, Zehbour. Estudo do mecanismo de eletrodeposição do cobre a partir do HEDP por meio da técnica eletroquímica de medição do potencial de circuito aberto. 2010.
- [5] CARVALHO, Marcos Fernandes de et al. Estudo da influência dos aditivos manitol, EDTA e NTA no processo de eletrodeposição de zinco sobre aço 1010 e na morfologia dos eletrodepósitos. 2009.
- [6] SILVA, Rosana Vilarim da. Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [7] MARINHO, Nelson P. et al. Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2013.
- [8] NUNES, Marta Regina dos Santos; MARTINELLI, Marcia; PEDROSO, Marcelo Monteiro. Epoxidação do óleo de mamona e derivados empregando o sistema catalítico VO (acac) 2/TBHP. Química nova. São Paulo. Vol. 31, n. 4 (jun. 2008), p. 818-821, 2008.
- [9] TOMACHUK, CELIA R.; COSTA, ISOLDA. Revestimentos de zinco sobre aços e suas aplicações. Corrosão e Proteção.
- [10] NUNES, F. G. et al. EFEITO DA GELATINA COMO ADITIVO PARA ELETRODEPOSIÇÃO DE LIGAS Zn-Co A PARTIR DE CORRENTE PULSADA SIMPLES. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 14059-14066, 2015.
- [11] OSORIO, WRi et al. A influência da microestrutura da liga Pb-0, 85% Sb em seu comportamento eletroquímico. Matéria (Rio de Janeiro), 2008.

Capítulo 14

Caracterização morfológica de fibras de ECOVIO®/PNIPAAm obtidas por meio da técnica de eletrofiação

Priscila Schroeder Curti

Ricardo Luiz de Souza

Resumo: Fibras de blendas de Ecovio®/PNIPAAm foram preparadas a partir de soluções desses polímeros em diferentes proporções mássicas (m/m) utilizando a técnica de eletrofiação. Essas fibras foram analisadas por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Verificou-se que as fibras de Ecovio® puro, obtidas a partir de soluções a 20%, apresentaram diâmetros médios na faixa de 380 a 500 nm, havendo ainda a presença de contas. A adição de PNIPAAm melhorou a eletrofiabilidade das soluções, no entanto ocorreu um aumento significativo de viscosidade, de modo que os experimentos de eletrofiação das soluções das blendas de Ecovio®/PNIPAAm foram realizados utilizando a concentração a 10%. Foi verificado que o aumento da porcentagem de PNIPAAm nas blendas diminuiu a quantidade de contas nas fibras e ao mesmo tempo aumentou os valores de diâmetro médio para a faixa micrométrica, em torno de 1400 nm a 1700 nm.

Palavras-chave: Ecovio®, PNIPAAm, blendas, eletrofiação, fibras.

*Este trabalho foi apresentado no 22º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia dos Materiais, 22º CBECiMat, que ocorreu em Natal/RN-Brasil, no período 06 a 10 de novembro de 2016, sendo que o texto foi publicado integralmente nos Anais desse Congresso.

1 INTRODUÇÃO

Blendas poliméricas são definidas como misturas físicas entre dois ou mais polímeros ou copolímeros [1], visando o sinergismo entre cada constituinte envolvido, a fim de obter um material com melhores propriedades que os constituintes puros [2].

A eletrofiação é uma técnica de processamento cada vez mais explorada com o intuito de obter fibras com diâmetros muito pequenos, variando desde alguns micrômetros até nanômetros [3-5]. O aparato experimental é relativamente simples e as fibras obtidas apresentam alta razão área-volume [3]. Geralmente, fibras são obtidas a partir de soluções poliméricas, e suas propriedades tais como flexibilidade, porosidade, resistência mecânica, funcionalidade específica, bem como sua resposta a estímulos externos dependem do par polímero-solvente [6,7]. Além do par polímero-solvente, outros parâmetros experimentais afetam as propriedades finais da fibra, cujos principais são: concentração da solução polimérica, condutividade da solução, fluxo de injeção, voltagem aplicada, distância entre a ponta da agulha e o coletor e tipo de agulha [7]. A otimização e o controle desses parâmetros podem resultar em fibras com propriedades muito interessantes e com uma ampla gama de aplicação.

O polímero de nome comercial Ecovio®, produzido pela BASF, é uma blenda constituída de dois polímeros biodegradáveis, o poli(butileno adipato co-tereftalato) – PBAT, produzido pela mesma empresa e cujo nome comercial é Ecoflex®; e o poli(ácido láctico) ou polilactato – PLA, um poliéster alifático. O Ecovio® possui uma resistência mecânica considerável, além de elevado módulo de elasticidade. Esse copolímero é utilizado em variadas aplicações, tais como: sacolas plásticas, embalagens de revistas, tubetes para reflorestamentos, entre outras. [8,9]. O PNIPAAm é um polímero sintético e biocompatível, que apresenta propriedades termo-responsivas [10,11]. Esse polímero apresenta transição de fases do tipo LCST (Lower Critical Solution Temperature) em torno de 32 oC, em solução aquosa [10]. Abaixo da LCST, o grupo amida do PNIPAAm apresenta interações intermoleculares tipo interações de hidrogênio com as moléculas de água. Acima da LCST, ocorre uma mudança conformacional de sua cadeia polimérica, deixando os grupos isopropil mais expostos. Nessas circunstâncias as interações de hidrogênio tornam-se desfavorecidas, sendo rompidas, ocorrendo a separação de fases do sistema [10]. Em função desse comportamento termossensível o PNIPAAm é amplamente empregado na biomedicina, na área de liberação controlada de fármacos e de genes e na área de engenharia de tecidos [12], dentre outros. Nesse sentido, o presente trabalho tem como finalidade avaliar as propriedades morfológicas de blendas eletrofiadas, obtidas a partir de soluções de Ecovio®/PNIPAAm, em diferentes proporções mássicas (m/m).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Ecovio® (BASF), N-isopropilacrilamida 97 % (Aldrich), persulfato de sódio 99% (Na₂S₂O₈ - Vetec), N,N,N',N'-tetrametilenodiamino (TEMED-Aldrich), clorofórmio (CHCl₃-Alphatec) e N,N-dimetilformamida (DMF-F. Maia). Todos os reagentes foram usados como recebido.

2.2. MÉTODOS

Síntese do PNIPAAm

O PNIPAAm foi sintetizado por iniciação redox em meio aquoso [10]. Em uma solução aquosa de NIPAAm foi adicionado Na₂S₂O₈, sendo desoxigenada com N₂(g) durante 30 min. Em seguida, o TEMED foi adicionado e a reação de polimerização ocorreu durante 6 h, a temperatura ambiente e sob atmosfera de N₂(g). A razão molar entre NIPAAm:Na₂S₂O₈:TEMED, calculado com base na proporção entre as massas de cada componente adicionado à solução, foi de 1:0,05:0,025, respectivamente. Após a reação, o PNIPAAm foi precipitado e purificado por gotejamento em água a 60 oC, sob forte agitação e seco em estufa com circulação de ar a 70 oC por 48 h. A massa molar viscosimétrica do PNIPAAm foi determinada em solução aquosa a 25 oC a partir da técnica de viscosimetria de soluções diluídas, utilizando a equação de Mark-Houwink (1):

$$[\eta] = K(Mv)^a \quad (1)$$

Onde:

$[\eta]$ é a viscosidade intrínseca do polímero;

K e a são as constantes de Mark-Houwink para o par polímero-solvente, para uma determinada temperatura;

Mv é a massa molar viscosimétrica do polímero.

O valor da massa molar viscosimétrica do PNIPAAm foi estimado em $8,7 \times 10^5 \text{ g.mol}^{-1}$. As constantes a e K utilizadas para a solução aquosa de PNIPAAm foram 0,97 e $2,26 \times 10^{-4} \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$, respectivamente [11].

Eletrofiação de blendas de Ecovio®/PNIPAAm

Soluções de Ecovio®, de PNIPAAm e de misturas de Ecovio®/PNIPAAm, em diferentes proporções mássicas (m/m), foram preparadas usando os solventes CHCl_3 e DMF na razão de 85/15 (V/V) [13]. A solução polimérica foi eletrofiada a um fluxo constante, por meio de uma seringa acoplada a uma bomba de infusão KD Scientific – 100. O coletor, consistindo de uma placa metálica, foi posicionado horizontalmente à seringa. Uma fonte de alta tensão (30 kV) foi conectada na ponta da agulha metálica e aterrada no coletor, formando uma diferença de potencial entre esses dois pólos. Todos os experimentos de eletrofiação foram realizados a temperatura e umidade relativa ambiente ($T = 22 \text{ oC}$ e $\text{UR}\% = 50\%$). Inicialmente, testes preliminares de eletrofiação foram realizados para as soluções de Ecovio® puro, variando os parâmetros experimentais. Em seguida soluções de Ecovio®/PNIPAAm em diferentes proporções mássicas (m/m) foram eletrofiadas. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros usados para o estudo de eletrofiação dessas blendas.

Caracterização morfológica das fibras eletrofiadas

Algumas fibras de Ecovio®/PNIPAAm eletrofiadas foram caracterizadas morfolologicamente por meio da análise das microscopias de MEV, obtidas em um equipamento marca FEI, modelo Quanta 200, presente no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise, LMEM, da Universidade Estadual de Londrina, UEL. As amostras foram previamente recobertas com uma fina camada de ouro. As imagens de MEV foram obtidas usando a potência do feixe de elétrons de 30 kV e temperatura constante em 21 oC . Os valores de diâmetro médio das fibras foram obtidos a partir da análise das imagens de MEV utilizando o software SizeMeter 1.1. Para cada imagem foram analisadas 20 fibras, sendo realizadas três análises de diâmetro ao longo de cada uma delas.

Tabela 1: Parâmetros experimentais usados para os experimentos de eletrofiação de soluções de Ecovio®/PNIPAAm em diferentes proporções mássicas.

Amostra	Proporção entre Ecovio®/PNIPAAm (m/m)	Concentração (% - m.V-1)	Voltagem (kV)	Fluxo da solução (mL.h-1)	Distância de trabalho (cm)
01	100/0	10	15	0,5	15
02	100/0	10	10	1,0	15
03	100/0	10	15	1,0	15
04	100/0	10	20	1,0	15
05	100/0	10	15	1,0	25
06	100/0	20	20	1,0	25
07	100/0	20	10	1,0	15
08	100/0	20	15	1,0	15
09	100/0	20	20	1,0	15
10	100/0	20	15	1,0	25
11	100/0	20	20	1,0	25
12	85/15	10	15	1,0	25
13	70/30	10	15	1,0	25
14	50/50	10	15	1,0	25
15	0/100	10	15	1,0	25

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas as micrografias de MEV das fibras eletrofiadas de Ecovio® puro, cuja solução foi preparada na concentração de 10%. Pode-se verificar que, independente da alteração nos parâmetros experimentais de eletrofiação (Tabela 1), não houve a formação de fibras em nenhuma das condições estudadas, sendo observada apenas a formação de aglomerados coalescidos. Isso significa que a concentração de 10% de Ecovio® não foi suficiente para que a solução apresentasse viscosidade suficiente para formar fibras contínuas ao longo do processo. Esse comportamento pode estar relacionado ao baixo emaranhamento da solução polimérica, nessa concentração.

Figura 1: Micrografias de MEV obtidas para as fibras eletrofiadas de Ecovio® puro na concentração 10%: (A) Amostra 01, (B) Amostra 02 e (C) Amostra 03. Ampliação de 3000x.

Na Figura 2 são apresentadas as imagens de MEV das fibras de Ecovio® eletrofiadas a partir das soluções com concentração a 20%. Quando a concentração da solução de Ecovio® foi aumentada, foi possível observar a formação de fibras durante o processo, porém com a presença de contas. Mantendo a concentração de Ecovio® e a distância entre a ponta da agulha e o aparato fixas entre os experimentos 7 a 9 (20% e 15 cm), podê-se constatar que o aumento da tensão de 10 kV para 15 e 20 kV aumentou a quantidade de fibras formadas durante o processo de eletrofiação e aparentemente diminuiu o número de contas de forma mais significativa.

Figura 2: Micrografias de MEV obtidas para as fibras poliméricas eletrofiadas de Ecovio® puro na concentração 20%: (A) Amostra 09, (B) Amostra 10 e (C) Amostra 11. Ampliação de 3000x.

As amostras de Ecovio® eletrofiadas na concentração 20% que apresentaram melhores resultados foram as 10 e 11, nas quais a distância de trabalho foi fixada em 25 cm e a tensão variou entre 15 e 20 kV, respectivamente. Foi observado que a morfologia das fibras da amostra 10 apresentou-se arredondada, mas ainda com a presença de contas. Dessa forma, para os experimentos de eletrofiação das soluções de blendas de Ecovio®/PNIPAAm, em diferentes proporções, foram usadas as condições experimentais de 15

kV, 1,0 mL.h⁻¹ e 25 cm (Tabela 1). No entanto, para a concentração de 20% não foi possível realizar o processamento, pois a viscosidade das soluções foi muito elevada, devido à presença de PNIPAAm. Dessa forma esses experimentos foram conduzidos na concentração de 10%.

Na Figura 3 são apresentadas as imagens de MEV das blendas eletrofiadas de Ecovio®/PNIPAAm, em diferentes proporções mássicas. Pode ser verificado que a adição de PNIPAAm nas soluções de Ecovio® modificou consideravelmente a morfologia das mantas fibrilares eletrofiadas. Foi possível observar a formação de fibras a partir da solução de Ecovio®/PNIPAAm na proporção mássica de 85/15 (m/m). A adição de maiores proporções de PNIPAAm na mistura levou a uma diminuição expressiva do número de contas e, até mesmo ao seu desaparecimento nas fibras eletrofiadas, ao mesmo tempo que ocorreu um aumento dos valores de seus diâmetros médios.

Foram estimados os diâmetros médios das fibras eletrofiadas, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Pode ser verificado que o diâmetro médio das fibras de Ecovio® puro está na faixa de 380 a 500 nm. Também foi observado que à medida que a proporção de PNIPAAm na fibra aumentou, o diâmetro médio também aumentou, passando a apresentar valores na faixa micrométrica, de 1400 nm a 1700 nm, exceto para a amostra 12, que apresentou diâmetro médio em torno de 280 nm, provavelmente devido à menor proporção de PNIPAAm presente nas fibras.

Figura 3: Micrografias de MEV obtidas para as fibras poliméricas eletrofiadas de Ecovio®/PNIPAAm em diversas proporções mássicas (m/m): (A) Amostra 12 (Ecovio®/PNIPAAm-85/15); (B) Amostra 13 (Ecovio®/PNIPAAm-70/30); (C) Amostra 14 (Ecovio®/PNIPAAm-50/50) e (D) Amostra 15 (Ecovio®/PNIPAAm-0/100). Ampliação de 3000x.

Com base nos resultados apresentados, pode-se dizer que existiu um aumento significativo nos valores de diâmetro médio das fibras de blendas eletrofiadas de Ecovio®/PNIPAAm, com diferentes proporções mássicas de PNIPAAm. No entanto, não foi verificada uma proporcionalidade linear entre o aumento da quantidade de PNIPAAm presente na blenda eletrofiada e o aumento do diâmetro médio. Provavelmente, esse aumento dos valores de diâmetro médio das fibras de Ecovio®/PNIPAAm está relacionado ao aumento da viscosidade da solução polimérica a ser eletrofiada. Sendo assim, pode-se inferir que a adição

de PNIPAAm à mistura melhorou a eletrofiabilidade da solução, pois as contas desapareceram das fibras eletrofiadas; no entanto ocorreu um aumento significativo dos valores de diâmetro médio das fibras, comparadas às fibras de Ecovio® puro.

Tabela 2: Valores de diâmetro médio das fibras poliméricas de Ecovio®/PNIPAAm eletrofiadas em diferentes condições experimentais

Amostra	Proporção Ecovio®/PNIPAAm (m/m)	Concentração	Diâmetro médio (nm)	Desvio Padrão (nm)
6	100/0	20%	380,4	± 114,9
7	100/0	20%	513,6	± 261,8
8	100/0	20%	460,8	± 170,1
9	100/0	20%	429,9	± 266,0
10	100/0	20%	404,9	± 152,1
11	100/0	20%	501,7	± 146,7
12	85/15	10%	276,6	± 097,6
13	70/30	10%	1691,7	± 328,9
14	50/50	10%	1429,8	± 314,0
15	0/100	10%	1379,3	± 203,9

4 CONCLUSÕES

As soluções de Ecovio®, nas concentrações de 10% e de 20% foram eletrofiadas, variando as condições experimentais de distância de trabalho, tensão e fluxo da solução. Verificou-se que as soluções de Ecovio® puro a 10%, eletrofiadas em diferentes condições experimentais, não formaram fibras, mas apenas aglomerados. As soluções de Ecovio® puro a 20% formaram fibras apresentando morfologia arredondada e com diâmetro médio na faixa de 380 nm a 500 nm, mas ainda ocorreu a formação de muitas contas, de modo que a variação dos parâmetros de eletrofiação citados acima não reduziu ou eliminou as contas das fibras de Ecovio® puro. A adição de PNIPAAm à solução, formando blendas de Ecovio®/PNIPAAm com diferentes proporções mássicas (m/m), alterou a morfologia das fibras eletrofiadas. As fibras de Ecovio®/PNIPAAm na proporção mássica de 85/15 ainda apresentaram muitas contas, sendo que o diâmetro diminuiu para próximo de 280 nm. Por outro lado, nas proporções mássicas de 70/30 e de 50/50 as fibras apresentaram morfologia arredondada e o completo desaparecimento das contas. Além disso, observou-se um aumento significativo dos valores de diâmetro médio das fibras de blendas de Ecovio®/PNIPAAm, comparadas às fibras de Ecovio® puro, que passaram de valores na faixa de 380 nm - 500 nm para uma faixa micrométrica de 1400 nm - 1700 nm.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio:

Da Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR – Câmpus Londrina – Paraná/Brasil (Ricardo L. de Souza (IC) – Bolsista da UTFPR/Brasil).

Do CNPq - apoio financeiro (Projeto Universal – Processo - 443480/2014-1).

Da BASF - doação do Ecovio®.

Do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise, LMEM, da Universidade Estadual de Londrina, UEL – obtenção das imagens de MEV.

REFERÊNCIAS

- [1] Ultracki, L. A. Polymer alloys and blends: Thermodynamics and rheology. Munich; Vienna; New York: Hanser Publishers, 1989.
- [2] de Paoli, M. - A. Degradação e estabilização de polímeros. São Paulo: Artliber, 2008.
- [3] Okuzaki, H.; Kobayashi, K.; Yan H. Thermo-responsive nanofiber mats. *Macromolecules*, v 42, n. 16, p. 5916-5918, 2009.
- [4] Yu, D. - G.; White C. - B.; Bligh, S. W. A.; White, K.; Chatterton, N. P.; Zhu, L. - M. Improving polymer nanofiber quality using a modified co-axial electrospinning process. *Macromol. Rapid Commun*, v 32, n. 9-10, p. 744-750, 2011.
- [5] Fathona, I. W.; Yabuki, A. A simple one-step fabrication of short polymer nanofibers via electrospinning. *J. Mater. Sci.*, v 49, n. 9, p. 3519-3528, 2014.
- [6] Ramakrishna, S.; JOSE, R.; Archana, P. S.; Nair, A. S.; Balamurugan, R.; Venugopal, J.; Teo, W. E. Science and engineering of electrospun nanofibers for advances in clean energy, water filtration, and regenerative medicine. *J. Mater. Sci.*, v 45, n. 23, p. 6283-6312, 2010.
- [7] Costa, R. G. F.; de Oliveira, J. E.; de Paula, G. F.; Picciani, P. H. S.; de Medeiros, E. S.; Ribeiro, C.; Mattoso, L. H. C. Eletrofição de polímeros em solução. Parte I: fundamentação teórica. *Polímeros: Ciênc. Tecnol.*, v 22, n. 2, p. 170-177, 2012.
- [8] VIANA, J. D.; ARAÚJO, E. M.; MELO, T. J. A. Avaliação das propriedades mecânicas de bionanocompósitos PLA/PBAT/Argila organofílica. *Rev Eletrôn Mat Proces*, v 7, n. 1, p. 20-25, 2012.
- [9] COSTA, M. C.; OLIVEIRA, S. V.; ARAÚJO, E. M. Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA. *Rev Eletrôn Mat Proces*, v 9, n. 2, p. 112-117, 2014.
- [10] Schild, H. G. Poly(N-isopropylacrylamide): Experiment, theory and application. *Prog. Polym. Sci.*, v 17, n. 2, p.163-249, 1992.
- [11] Muniz, E. C.; Geuskens G. Compressive elastic modulus of polyacrylamide hydrogels and semi-IPNs with poly(N-isopropylacrylamide). *Macromolecules*, v 34, n. 13, p. 4480-4484, 2001.
- [12] GEORGIU, T. K.; WARD, M. A. Thermoresponsive polymers for biomedical applications. *Polymers*, v 3, n. 3, p.1215-1242, 2011.
- [13] Goes, A. M.; Carvalho, S.; Oréfice, R. L.; Avérous, L.; Custódio, T. A.; Pimenta, J. G.; Souza, M. B.; Branciforti, M. C.; Bretas, R. E. S. Viabilidade celular de nanofibras de polímeros biodegradáveis e seus nanocompósitos com argila montmorilonita. *Polímeros*, v 22, n. 1, p.34-40, 2012.

Capítulo 15

Influência da temperatura de queima nas propriedades de vitrocerâmicas produzidas com pó de vidro reciclado e adição de óxido de nióbio

Hasmin Rohem Gualberto

Pedro Martins da Rocha

Fernanda Arruda Nogueira da Silva

Edgar Poiate Júnior

Isis Andrea Venturini Pola Poiate

Mônica Calixto de Andrade

Resumo: O aumento do consumo, as legislações ambientais e o crescente acúmulo de lixo têm gerado preocupação quanto ao destino dos resíduos. Assim, pesquisas vêm buscando dar destino e agregar valor aos materiais descartados. Nesse estudo, vitrocerâmicas foram produzidas a partir de vidro de ampolas descartadas da indústria. Foi adicionado 15 % de óxido de nióbio e foram usadas as temperaturas de 800, 850 e 900 °C na sinterização. O material obtido possui transição vítrea próximo a 750 °C. Todas as temperaturas de sinterização adotadas apresentaram picos de cristalização, segundo o difratograma de raios X. A densidade diminuiu e a retração linear aumentou com o aumento da temperatura. Já a micro dureza Knoop, esta melhorou com a elevação da temperatura, no entanto a resistência a flexão biaxial decresceu.

Palavras-chave: Vitrocerâmica, reciclagem, óxido de nióbio, flexão biaxial.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da indústria e o crescimento do consumo, muito resíduo sólido tem sido produzido. Assim, é despertada a preocupação ambiental, e junto com ela foram sendo criadas legislações ambientais que buscam reduzir a poluição causada pelo lixo gerado pela sociedade 1.

Tendo em vista esse cenário, a pesquisa científica vem sendo peça chave para ajudar a solucionar os problemas dos resíduos gerados 2. Novas utilidades para os materiais descartados vêm sendo desenvolvidas, sempre associado ao aumento do valor agregado e diminuição de gastos energéticos 1,3.

Diversos trabalhos vêm propondo a produção de vitrocerâmicas a partir de resíduos. Esse material, que pode ser obtido pela cristalização controlada de vidro, possuem excelentes propriedades mecânicas, durabilidade e estabilidade química, têm uma grande variedade de aplicações 4,5. Assim, diversos estudos avaliaram a produção de vitrocerâmicas com resíduo inorgânico. KANG (2016) utilizou resíduos de granito para produzir vitrocerâmicas 6. Já Cao (2016) desenvolveu sua pesquisa a partir de escória de silício para obtenção de vitrocerâmicas porosas 7. Lu et al. (2016), além de cinzas de usinas termoeletrica³, também utilizou vidro descartado como matéria prima para seu estudo. Tais estudos mostram a possibilidade de obter vitrocerâmicas, a partir de material descartado, com diversas aplicações. Logo, essa é uma alternativa para o destino de materiais obsoletos.

Além dessas aplicações, as vitrocerâmicas também são conhecidas por suas excelentes propriedades dielétricas, o que aumenta sua gama de aplicações comerciais 5. O uso de agente nucleante, que é utilizado para induzir a cristalização volumétrica, possibilita a formação de cristais específicos, como é o caso de cristais do grupo perovskita, que pode ser obtido pela adição de óxido de nióbio no pó de vidro 8.

Neste trabalho vitrocerâmicas foram produzidas com vidro de ampolas descartadas pela indústria. Foi adicionado óxido de nióbio para facilitar a cristalização, buscando favorecer a cristalização e produzir estruturas piezelétrica.

2 METODOLOGIA

2.1 PREPARAÇÃO DAS VITROCERÂMICAS

As vitrocerâmicas foram produzidas a partir de pó de vidro de ampolas defeituosas. As características do pó de vidro fornecida pelo fabricante são apresentadas na Tabela 1. Foram adicionados 15 % de óxido de nióbio (Nb₂O₅). Nessa mistura de vidro e nióbio adicionou-se 10 % p/p de água para aglutinar e facilitar o processo de compactação e também a remoção da peça do molde. Três gramas da mistura foram conformados por prensagem uniaxial em matriz metálica circular de 24,03 mm de diâmetro. Foi aplicada uma carga de 25,77 MPa por 1 minutos com uma prensa (P10 ST 10 ton, Bovenau, Brazil). Para facilitar a remoção da peça foi utilizando um desmoldante de silicone (Carbografite, Brasil) na parede da matriz.

Tabela 1: Características do pó de vidro fornecidas pelo Fabricante.

Composição	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	MgO	CaO	TiO ₂	PbO	B ₂ O ₃
(%)	80,53	3,64	0,08	7,96	0,05	1,37	0,05	0,49	0,09	0,02	5,38

Após compactadas os corpos de prova (CPs) foram secos em estufa (400/3ND, Nova Ética, Brazil) na temperatura de 110 °C por uma hora para remoção da água adicionada. Na sequência, os CPs foram submetidos ao processo de sinterização em forno de mufla (N1100, Fornitec, Brasil) e foi utilizada alumina para forrar a base do forno onde as peças eram colocadas. Foram utilizadas as temperaturas de 800, 850 e 900 °C, sendo produzidos três grupos de peças, G1, G2 e G3, respectivamente.

2.2 CARACTERIZAÇÕES

A composição do pó de vidro das ampolas foi identificada e quantificada pela fluorescência de Raios X, realizada utilizando o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X S8 Tiger Spectrometer (Bruker X-ray, United States). Esse resultado foi confrontado com o informado pelo fabricante das ampolas.

Foram realizadas a análise térmica diferencial (DTA) e a termogravimetria (TG) em um pedaço da peça conformada antes de sinterizar (Simultaneous Thermal Analyser STA 6000, PerkinElmer, Estados Unidos).

As amostras foram mantidas em ar, com taxa de aquecimento de 5 °C/min e temperatura variou de 30 a 900 °C.

O método do pó foi utilizado para a difração de raios x, feita nas vitrocerâmicas produzidas, quebradas e moídas (Bruker-D8 Endeavor, Estados Unidos). As condições da análise foram: radiação CuK α (40 kV/40 mA), velocidade do goniômetro de 0,02° 2 θ por passo e com tempo de contagem de 0,5 segundos por passo, sendo coletados de 4 a 80° 2 θ , com detector sensível à posição (LynxEye, Inglaterra).

A densidade de massa aparente (d_{ma}), a porosidade aparente (p_a) e a absorção de água (a) foram obtidas segundo a ABNT NBR 16661 9. Para determinação de d_{ma} , foi preciso determinar a massa seca

(m_s), a massa úmida (m_u) e a massa imersa (m_i). Para m_s , os CPs foram aquecidos a 150 °C durante 8 horas antes de serem pesados. Os corpos de prova foram submersos em água fervente por duas horas, e ainda ficaram por mais vinte e quatro horas em água após a remoção da fonte de calor. Conhecendo as massas de cada peça, determina-se o volume aparente (v_a) pela equação A. $m_{e_liquido}$ é a massa específica da água, usada no procedimento, com valor de 1,00g/cm³.

$$v_a = \frac{m_u - m_i}{m_{e_liquido}} \quad (A)$$

Com isso, a densidade de massa aparente é determinada pela equação B.

$$d_{ma} = \frac{m_s}{v_a} \quad (B)$$

Pela mesma norma, foram encontradas a porosidade aparente (p_a) e a absorção de água (a), dadas pelas equações C e D respectivamente.

$$p_a = \left(\frac{m_u - m_s}{m_{e_liquido} \cdot v_a} \right) 100\% \quad (C)$$

$$a = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) 100\% \quad (D)$$

Após sinterizadas, os diâmetros das peças foram medidos para o cálculo da retração linear

(R), conforme equação E. Nesse caso, C_i é o diâmetro da peça antes da sinterização, considerado igual ao diâmetro da matriz, e C_f é o diâmetro pós sinterização. O valor do diâmetro adotado é a média de três medições.

$$R = \frac{C_i - C_f}{C_i} 100\% \quad (E)$$

O ensaio de microdureza Knoop foi realizado segundo a norma ASTM C1326 10 (Wilson Tukon 1102 (Buehler, Estados Unidos). Os corpos de prova precisaram ser previamente preparados, afim de obter planicidade e paralelismo entre as superfícies. Assim, os CPs foram lixados em politriz (Panambra, Brasil), usando lixas d'água com as granulometrias 220, 320, 500, 600 e 1200. Começando da menor granulometria para a maior, sempre rotacionando em 90° ao mudar de lixa. Após esse processo os corpos de prova foram polidos com pasta de diamante de 1 μ m lubrificada (Arotec, Brasil) e tecido DP-Mol (Struers, Estados Unidos). Durante o polimento, as peças foram rotacionadas em 90° por seis vezes a cada dois minutos.

Pelo menos seis indentações em três CPs de cada grupo, foram realizadas. Os resultados de cada um são as médias das seis melhores endentações dos três CPs. A dureza Knoop (HK_n) é obtida pela equação F. Nessa equação, a carga utilizada (P) nas indentações foi de 500 gf e d é a medida da maior diagonal da marcação.

$$HK_n = 14,299 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (F)$$

O ensaio de flexão biaxial foi realizado na máquina de ensaios mecânicos AGX-Plus (Shimadzu, Japão), segundo a norma ASTM1499-05 11. Para determinação da tensão biaxial máxima suportada pelo material, σ_f , são utilizadas a medida da média de três diâmetros do CP (D), D_l e D_s , que são as médias entre os diâmetros interno e externo do maior anel de aplicação da carga e do anel de apoio do corpo de prova. Assim, a σ_f pode ser determinada segundo a equação G.

$$\sigma_f = \frac{3F}{2\pi h^2} \left[(1 - \nu) \frac{D_s^2 - D_l^2}{D^2} + (1 + \nu) \ln \left(\frac{D_s}{D_l} \right) \right] \quad (G)$$

A equação H foi usada para calcular o módulo de Weibull e avaliar os resultados da resistência à flexão biaxial. Uma vez que a distribuição dos resultados de resistência de materiais cerâmicos é assimétrica, recomenda-se usar a distribuição de Weibull para avaliar essa variação de resultados. Quanto maior o módulo mais confiável é o material 12.

$$P(\sigma_f) = 1 - \exp[-\sigma_f/\sigma_0]^m \quad (H)$$

Onde, $P(\sigma_f)$ é a função probabilidade de fratura, σ_0 é a tensão característica, m é o módulo de Weibull, que é a inclinação do gráfico $\ln(-\ln 1/1-P)$ versus $\ln \sigma$. A função probabilidade de fratura é obtida conduzindo N testes, organizando a tensão de ruptura em ordem crescente, conforme equação I. Nessa equação, i é o número da amostra e N é o número de peças utilizadas para essa análise.

$$P = \frac{i}{N + 1} \quad (I)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos pela fluorescência de raios x. Comparando as Tabela 1 e 2, percebe-se que a fluorescência não identificou todos os compostos indicados pelo fabricante, no entanto os de maior composição foram constatados.

A análise termogravimétrica (TG) é apresentada na Figura 1, que mostra que até 300 °C há uma pequena perda de massa contínua de 1,65 %, devendo estar relacionada a água adicionada no processo de conformação ou adsorção de umidade. Entre 300 e 600 °C ocorre uma perda de 0,31 % que pode estar relacionada a remoção de água estrutural, e/ou presa nos poros, ou a degradação de algum composto do pó de vidro 13, 14. Também é evidenciado um ligeiro ganho de massa, 0,24 %, após 600 °C, que deve ser atribuído à reação no estado sólido do óxido de nióbio. Azevedo sintetizou niobato de sódio por reação no estado sólido, com óxido de nióbio e hidróxido de sódio em 500 °C 15. As vitrocerâmicas produzidas foram tratadas termicamente em temperaturas mínima de 800 °C, ou seja, foram usadas temperaturas superiores a usada por Azevedo (2010). O niobato de sódio é uma estrutura cristalina do grupo perovskita, que possui propriedades ferroelétricas 15.

Tabela 2: Composição química do pó vidro obtido pela fluorescência de raios x.

Composição	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO
%	87,40	6,16	4,86	1,57

Também na Figura 1 observa-se a curva da análise termodiferencial, DTA. Nesta curva ocorre uma ligeira mudança entre as temperaturas de 700 °C e 800 °C. Esse evento pode estar relacionado a temperatura de transição vítrea. Assim, as temperaturas de sinterização usadas neste trabalho foram superiores à temperatura para síntese do niobato de sódio e à temperatura de transição vítrea.

Com os difratogramas de raios X, mostrados na Figura 2, constatou-se a cristalização das peças produzidas em todas as temperaturas de sinterização. É importante observar que as intensidades das estruturas cristalinas variam com o aumento da temperatura de sinterização. Na menor temperatura de sinterização, 800 °C, formou zeolita (Z), quartzo- SiO₂ (Q), isolueshita - NaNbO₃ (I) e estilbita (E). Com o aumento de 50 °C na sinterização, não formou mais zeolita, aumentou a intensidade dos picos referentes a quartzo e diminuiu a intensidade dos picos referentes a isolueshita. Na temperatura de sinterização de 900 °C, continuou a diminuição da intensidades dos picos referentes a isolueshita e o aumento do quartzo. Em relação a estilbita, não observou grande variação de intensidade com o aumento da temperatura de sinterização.

Figura 1: Análise térmica: DTA e TG.

Figura 2: Difração de Raios X.

A densidade aparente teve pequeno aumento com aumento da temperatura de sinterização de 800 para 850 °C, porém quando passou para 900 °C ocorreu diminuição. De forma semelhante ocorre com a absorção de água, que aumenta e depois diminui com a elevação da temperatura de sinterização. No caso da porosidade aparente, esta aumenta significativamente, passando de 2,067 % para 4,835 %, nas temperaturas de 800 °C e 850 °C, respectivamente. Esses resultados são apresentados na Tabela 3. A diminuição da densidade está relacionada com o aumento rápido da viscosidade, causado pelo aumento de cristalização. Uma vez que a densificação ocorre por fluxo viscoso 16, o aumento da viscosidade atrapalha a sinterização, o que acarreta materiais mais porosos 13.

Tabela 3: Dados do cálculo da densidade e retração linear.

Temperatura		Média	DP		Média	DP
G3 - 900 °C	Densidade aparente (g/cm ³)	2,299	0,025	Espessura (mm)	3,740	0,051
	Absorção de água (%)	1,849	0,852	Diâmetro (mm)	20,706	0,060
	Porosidade aparente (%)	4,238	1,901	Retração linear (%)	13,8	0,002
G2 - 850 °C	Densidade aparente (g/cm ³)	2,326	0,004	Espessura (mm)	3,558	0,029
	Absorção de água (%)	2,078	0,202	Diâmetro (mm)	20,913	0,037
	Porosidade aparente (%)	4,835	0,467	Retração linear (%)	12,9	0,001
G1 - 800 °C	Densidade aparente (g/cm ³)	2,313	0,016	Espessura (mm)	3,467	0,035
	Absorção de água (%)	0,895	0,279	Diâmetro (mm)	21,107	0,039
	Porosidade aparente (%)	2,067	0,626	Retração linear (%)	12,1	0,001

De semelhante modo as dimensões dos CPs também variaram, como pode ser observado na Tabela 2. As maiores espessuras ocorreram nas maiores temperaturas, sendo em média de 3,74 mm para 900 °C. Já o diâmetro teve leve diminuição, o que acarretou em maior retração linear com o aumento da temperatura. Para visualizar melhor como essa variação de dimensão interfere na densidade foi calculado o volume, a partir desses dados. Para o G3 o volume foi de 5038,384 mm³, para G2 4889,415 mm³ e G1 4853,132 mm³. Assim, observa-se que o maior volume ocorre para o grupo de menor densidade.

Dos resultados da microdureza Knoop, Tabela 4, percebeu-se que a maior microdureza, 372 HK, ocorreu para G2, grupo de maior densidade. Além disso, também foi o grupo de menor desvio padrão (DP) na microdureza, cerca de 1,13. O que mostra que a temperatura de sinterização de 850 °C é a de maior reprodutibilidade nos resultados. Já para as peças sinterizadas em 900 °C, houve o maior DP e para as de 800 °C ocorreu a menor microdureza. No entanto, para esta última ocorreu a maior resistência à flexão biaxial, como pode ser observado na Tabela 5. Danassollo et al. e Soldani estudaram esmaltes de dentes humanos e encontraram uma dureza Knoop que varia entre 326 a 441 HKn, Essa faixa de dureza engloba os resultados das vitrocerâmicas produzidas com 15 % de óxido de nióbio 17,18.

Tabela 4: Microdureza Knoop.

Temperatura	Cp1	Cp2	Cp3	Média HK	Desvio Padrão (DP)
G3 - 900 °C	358,51	331,58	358,16	349,42	15,448
G2 - 850 °C	374,02	371,91	372,23	372,72	1,134
G1 - 800 °C	330,23	331,31	347,48	336,34	9,662

A resistência à flexão biaxial, apresentou baixo desvio padrão para todas os grupos de peças. Porém a variação de temperatura influenciou bastante na resistência, tendo sido 15,837 MPa na temperatura de 800 °C, a maior das resistências. Já em 850 °C ocorreu a menor resistência (5,686 MPa), temperatura em que se obteve a maior densidade. Com o aumento da temperatura a resistência volta a crescer, alcançando 9,633 MPa. Os valores da resistência biaxial encontrados foram superiores ou próximos aos encontrados por Kim e et al. em seu estudo com concreto ensaiado com a mesma flexão biaxial (ring-on-ring)¹⁹.

Tabela 5: Resultados da Resistência à Flexão Biaxial.

Temperatura	Média da Resistência à Flexão [MPa]	Desvio Padrão (DP)	Módulo de Weibull (m)	R2
G3 - 900 °C	9,633	2,732	4,062	0,945
G2 - 850 °C	5,686	1,826	3,597	0,906
G1 - 800 °C	15,837	2,081	8,434	0,967

Para obtenção do Módulo de Weibull foi utilizada a inclinação das curvas da Figura 3. Por essa figura percebe-se que a maior inclinação, $m=8,434$, ocorre para o grupo de peças produzidas na temperatura de 800 °C, temperatura em que também se alcançou a melhor resistência. Já avaliando o R2, segundo a Tabela 5, o maior também ocorre para a temperatura de 800 °C, e os demais foram todos maiores que 0,9 valores superiores aos encontrados por Defez et al. em seus testes de flexão com materiais frágeis 21.

Visando facilitar a visualização da influência da porosidade aparente sobre a resistência a flexão biaxial e a microdureza Knoop, essas propriedades foram plotadas em um gráfico, Figura 4, para cada um dos três grupos de vitrocerâmicas. Nota-se, de maneira geral, que o aumento da porosidade aparente melhora a dureza do material. Pois em maiores temperaturas ocorre maior vitrificação da superfície, melhorando a dureza. Por outro lado, o aumento da porosidade acarreta menor resistência biaxial.

Figura 3: Módulo de Weibull.

Figura 4: Resistência à flexão, dureza Knoop e porosidade dos três grupos.

4 CONCLUSÃO

Percebeu-se que a temperatura de sinterização influencia as propriedades de vitrocerâmicas. O aumento da temperatura de sinterização acarretou no aumento da porosidade aparente, o que também ocasionou redução na resistência à flexão biaxial, por outro lado o aumento da temperatura melhorou a dureza do material. A distribuição de Weibull mostrou que os resultados da flexão biaxial são confiáveis. As vitrocerâmicas com 15 % de óxido de nióbio apresentam as melhores propriedades na temperatura de 800 °C, com menor retração linear, menor porosidade aparente, maior resistência a flexão biaxial, melhor módulo de Weibull, apesar de ter a menor dureza entre as três temperaturas adotadas. Em relação à difração de raios X, o aumento da temperatura de sinterização proporcionou aumento do teor de quartzo e diminuição do teor de isolueshita, NaNbO_3 .

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da pesquisa fornecido pelo CNPq, CAPES e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

- [1] LU, X. et al. Effect of composition and sintering process on mechanical properties of glass ceramics from solid waste. *Advances in Applied Ceramics*, v. 115, n. 1, p. 13-20, 2016.
- [2] BARRACHINA, E. et al. Development of a glass-ceramic glaze formulated from industrial residues to improve the mechanical properties of the porcelain stoneware tiles. *Materials Letters*, v. 220, p. 226-228, 2018.
- [3] LU, J.; CONG, X.; LU, Z. Influence of magnesia on sinter-crystallization, phase composition and flexural strength of sintered glass-ceramics from waste materials. *Materials Chemistry and Physics*, v. 174, p. 143-149, 2016.
- [4] WANG, Xin et al. Preparation and characterization of SO₃-doped barium borosilicate glass-ceramics containing zirconolite and barite phases. *Ceramics International*, v. 43, n. 1, p. 534-539, 2017.
- [5] FAN, C.S.; LI, K.C. Production of insulating glass ceramics from thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass and calcium fluoride sludge. *Journal of cleaner production*, v. 57, p. 335-341, 2013.
- [6] KANG, J. et al. Crystallization behavior and properties of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics synthesized from granite wastes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 457, p. 111-115, 2017.
- [7] CAO, J. et al. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*, v. 42, n. 8, p. 10079-10084, 2016.
- [8] HAN, D.F. et al. Glass-ceramic nanocomposites in the [(1-x) PbO-xBaO]-Na₂O-Nb₂O₅-SiO₂ system: Crystallization and dielectric performance. *Solid State Sciences*, v. 14, n. 6, p. 661-667, 2012.
- [9] NBR16661. Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção, ABNT, 2017.
- [10] ASTM C1326. Standard test method for Knoop indentation hardness of advanced ceramics. *Annual Book of ASTM Standards*, v. 15, 2013.
- [11] ASTM, C. 1499-05. Standard test method for monotonic equibiaxial flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2005.
- [12] KARAKOCA, S.; YILMAZ, H. Influence of surface treatments on surface roughness, phase transformation, and biaxial flexural strength of Y-TZP ceramics. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, v. 91, n. 2, p. 930-937, 2009.
- [13] LU, J. et al. Effect of sintering additives on the densification, crystallization and flexural strength of sintered glass-ceramics from waste granite powder. *Materials Chemistry and Physics*, 2018.
- [14] HARTLIEB, P. et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution. *Minerals Engineering*, v. 91, p. 34-41, 2016.
- [15] Azevedo, L.M.S. Síntese de niobato de sódio a partir de óxido de nióbio e nióbio metálico. 2010, 95p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia IME, Rio de Janeiro.
- [16] FREDERICCI, C. et al. Effect of temperature and heating rate on the sintering of leucite-based dental porcelains. *Ceramics International*, v. 37, n. 3, p. 1073-1078, 2011.
- [17] DONASSOLLO, T.A. et al. Avaliação da microdureza superficial do esmalte e da dentina de dentes bovinos e humanos (permanentes e decíduos). *Revista Odonto Ciência*, v. 22, p. 311-316.
- [18] SOLDANI, P. Alterações na microdureza do esmalte dental humano tratado "in vitro e in situ" com diferentes sistemas clareadores e espessantes. 2006, Dissertação (Mestrado em Odontologia) - UnG, Guarulhos.
- [19] KIM, J.; YI, C.; ZI, G. Biaxial flexural strength of concrete by two different methods. *Magazine of concrete research*, v. 64, n. 12, p. 1057-1065, 2012.
- [20] DEFEZ, Beatriz et al. Influence of the load application rate and the statistical model for brittle failure on the bending strength of extruded ceramic tiles. *Ceramics International*, v. 39, n. 3, p. 3329-3335, 2013.

Capítulo 16

Estampagem incremental em polímeros PETG e PVC

Cheng Te Hung

Manolo Lutero Gipiela

Paulo Victor Prestes Marcondes

Resumo: Na fabricação de produtos plásticos, requer um processo de transformação da matéria prima, o polímero termoplástico, que possui cadeias poliméricas geralmente lineares e são facilmente moldados quando submetidos ao calor, próximo ou acima da temperatura de fusão, de modo que ele se comporte como borracha ou líquido, é então introduzido em um molde ou em uma matriz, para se produzir a forma desejada. Tais como os termoplásticos, são submetidos a diversos processos de transformação: como moldagem por injeção, extrusão, sopro, moldagem por vácuo, rotomoldagem, compressão, técnicas utilizando espuma e fundição para se chegar a um produto moldado com determinado formato desejado. Porém surge, uma forma diferente de moldagem de termoplásticos que pode fazer sem a necessidade de moldes, denominada 'Estampagem Incremental' - ISF, do inglês "Incremental Sheet Forming", que consiste em desenhar o formato da peça e criar dimensões, em uma fresadora CNC através de um punção cilíndrico com ponta arredondada, diretamente a partir dos desenhos CAD. Neste trabalho a estampagem incremental foi feito para avaliar a conformabilidade do material polimérico: PVC e o PETG com 2mm de espessura, utilizando chapas com dimensões de 140 x 140 mm, ferramenta de conformação de 8 mm de diâmetro, através dos ensaios de tração, ensaio de Erichsen e ensaio de estampagem incremental com um centro de usinagem CNC da Romi. Foi analisada a conformabilidade dos materiais poliméricos PVC e PETG através da Curva Limite de Falha -CLF e ângulo de estampagem. Os resultados da estampagem incremental de polímeros PETG e PVC foram estudados e notou-se que a chapa polimérica PETG é a mais indicada para a estampagem incremental, conseguindo obter melhores resultados que a chapa polimérica PVC.

Palavras Chaves: Estampagem Incremental de Polímeros, Curva Limite de Conformação – CLC, Conformabilidade, Ângulo de Estampagem.

1 INTRODUÇÃO

O processamento convencional de polímeros baseia-se no aquecimento dos polímeros até amolecem e, em seguida, conformados antes de arrefecerem. Os processos utilizados, mais concretamente nos materiais poliméricos termoplásticos, são: a moldagem por injeção, a extrusão, a moldagem por sopro e a termo-conformação, Ashby, (2), Frazen, et al. (8), Smith (16).

A estampagem incremental, por outro lado, é uma forma diferente de moldagem aplicada para materiais em forma de chapa que pode ser realizada sem a necessidade de moldes. Neste processo a geometria da peça é obtida a partir da deformação imposta sequencialmente por um punção cilíndrico em movimento que desenvolve na chapa o perfil previamente definido (15).

Na indústria é incessante a produção de novos produtos. Mediante isso, existe a necessidade constante de desenvolver protótipos de forma agilizada, a fim de desenvolver de maneira mais rápida uma nova peça e avaliar sua funcionalidade (11). Protótipos são utilizados no processo de design de produto para permitir que engenheiros e designers tenham a capacidade de explorar alternativas de projeto, fazer testes e confirmar o desempenho antes da produção de um novo produto, Sena (13).

Estampagem Incremental de Ponto Simples – SPIF, ou de ponto único, definida pela sigla em inglês SPIF - Single-point Incremental Forming, provou ser viável para a produção de pequenos lotes de peças de chapa, em uma ampla gama de materiais e formas geométricas Jeswiet et al. (11).

Duflou et al. (6) e Hussain et al. (10) definem o processo SPIF como uma chapa plana de metal, presa num dispositivo móvel, que desliza paralelamente ao eixo Z, onde é conformado através de uma ferramenta que é um pequeno punção cilíndrico de vários tamanhos: 6mm, 10 e 30mm de diâmetro, podendo ser revestida ou mesmo feita de metal duro (carboneto cementado). Em alguns casos específicos, são necessárias ferramentas plásticas para evitar reações químicas com o material da chapa metálica de modo a melhorar a qualidade da superfície (Figura 1).

Figura 1: Modelos de ferramentas usadas na SPIF. Fonte: Jeswiet et al., (11).

Castelan et al. (3) relata que por não haver ponto de apoio inferior na estampagem incremental, o formato da peça final é determinado somente pelo deslocamento da ferramenta em 3 eixos (X, Y e Z). A chapa é fixada em suportes laterais que mantêm altura constante em relação à base. Hussain et al. (10) menciona em seus estudos que estes elementos de fixação evitam o movimento da chapa durante o processo, culminando na sua deformação plástica. A Figura 2 ilustra as características do processo descrito pelos autores citados.

Figura 2: Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF).

Fonte: A- Adaptado de Jeswiet et al. (11). Fonte: B- Sy (17).

Fato da ferramenta de deformação ser controlada por Computer Numerical Control -CNC, inspirou a criação de máquinas dedicadas, como a desenvolvida por Allwood et al.(1) (Figura 3A) na Universidade de Cambridge, e pela empresa japonesa Amino Corporation, que atualmente comercializa tal tecnologia. Entretanto, devido a praticidade, estudos a respeito, Castelan et al. (3), Calaver et al.(4) e Daleffe et al. (5) apontam a utilização de máquinas CNC (Figura 3B) na aplicação da estampagem incremental de chapas, enquanto Franzen et al. (8) e Marques et al. (12) utilizaram a máquina CNC na aplicação da estampagem incremental em polímeros.

Figura 3A: Máquina dedicada a ISF

Fonte A: Allwood et al. (1).

Figura 3B: Centro de Usinagem usado em ISF

Fonte B: Cavalier (4).

2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia e o planejamento experimental segue conforme o planejamento abaixo, ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma do planejamento experimental. Fonte: O autor (2017).

2.2. ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM FERRAMENTAL E MÁQUINA CNC

Os ensaios de estampagem incremental em polímeros PETG e PVC, foram realizados com um ferramental específico, de um punção cilíndrico e um suporte, ilustrado na Figura 5. No laboratório da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIC (SENAI-PR), setor de usinagem CNC, usou-se o ferramental VC131 da Villares Metals para o punção e aço 1045 para o suporte de fixação das chapas a serem estampadas. O punção foi temperado, revenido e usinado para acabamento, obtendo uma dureza de 54 HRC pós tratamento térmico.

Todos os ensaios com estampagem incremental foram realizados em um centro de usinagem ROMI Discovery 560, ilustrado na Figura 6.

Figura 5: Desenho do ferramental utilizado para execução dos ensaios de estampagem incremental de ponto único.

Fonte: O autor (2017)

Legenda: a) Punção cotado. b) Suporte montado em perspectiva.

Figura 6: Centro de usinagem e ferramental utilizado para execução dos ensaios de estampagem incremental de ponto único.

Fonte: O autor (2017)

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados das Falhas nos polímeros PETG e PVC

As pesquisas sobre EI para polímeros PETG e PVC, foram constatado que os polímeros adicionam novos fenômenos na caracterização dos limites de conformabilidade da estampagem incremental, introduzindo novos modos de falha que não são encontrados experimentalmente nos metais. A Figura 7 a 10 mostra os tipos de falha encontrado na Estampagem Incremental.

A falha da trinca circunferencial é uma abertura de fissura ao longo da direção circunferencial na zona de transição entre a parede inclinada e o raio de canto das peças, ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Defeito na Etampagem Incremental Trinca Circunferencial – PVC.

Fonte: O autor (2017)

A mecânica de deformação associada ao modo de falha de trinca circunferencial é causada por mecanismos de alongamento devido a tensões de tração - $\sigma\theta$, ilustrado na Figura 8. A morfologia das trincas e seus caminhos de propagação, ao longo da direção circunferencial são muito parecidos com os metais, mas diferem nos modos de falha dos polímeros PETG e PVC.

Figura 8: Tensão de Tração. Fonte: Franzen et al. (7).

A falha da deformação por enrugamento é desenvolvida pelas rugas ao longo da parede inclinada das peças (Figura 9), no qual o modo de falha é causado pela torção em torno do eixo de revolução na direção da rotação da ferramenta de formação, onde é desencadeada na região inferior da parede inclinada, perto do raio de canto. Franzen et al. (7) e Silva et.al (14) afirmam que a morfologia das rugas é uma clara indicação de dificuldades em resistir à torção de planos transversais radiais decorrentes do movimento da ferramenta de formação ao longo do percurso circular.

Figura 9: Defeito na Estampagem Incremental deformação por Enrugamento –PETG.

Fonte: O autor (2017).

Na Figura 10, a deformação é composta de duas falhas, a falha da trinca circunferencial e a falha de enrugamento ao longo da espessura da parede, com ligeira inclinação da parede para esquerda. Neste caso, a conformabilidade é limitada pelo desenvolvimento de rugas ao longo da parede inclinada das peças de estampagem incremental que se ocorreu mais cedo do que a trinca circunferencial.

Figura 10: Defeito na Estampagem Incremental –PETG Trinca Circunferencial com Enrugamento.

Fonte: O autor (2017).

3.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS: PETG E PVC

A partir do gráfico do diagrama de limite de falha, PETG e PVC foi realizado um levantamento das curvas de limite de falha, para efeito comparativo, ilustrado FIGURA 61. Nota-se que a nuvem de pontos apresenta diversos pontos de deformações, um ponto de deformação mínima em ϵ_1 próxima de 0,0 e um ponto de deformação máxima em ϵ_1 próxima de 1,4. Encontramos uma nuvem de pontos que apresentam várias deformações, um ponto de deformação mínima em ϵ_2 próxima de -0,40 e um ponto de deformação máxima em ϵ_2 próxima de 0,6.

Observa no lado esquerdo do diagrama, uma concentração de pontos de deformações em ϵ_2 próxima a um estado de tensão uniaxial do que de embutimento profundo. Pode-se observar que o valor de mínima deformação ocorreu no estado plano de tensões e deformações ($\epsilon_2=0$) somente para o polímero PVC.

A partir do gráfico do diagrama de limite de falha, PETG e PVC foi realizado um levantamento de duas curvas de limite de falha, ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Comparação Diagrama de Limite de FALHA PETG e PVC com 2 Curvas CLF

Fonte: O autor (2017).

A curva de limite de falha -CLF de PETG com polinômio de ordem 1, $y = -1,0499x + 1,1848$ apresentou limite de deformação com valor de ϵ_1 próxima de 1,20, e a curva de limite de falha-CLF de PVC com polinômio de ordem 1, $y = -0,0185x + 0,70$ apresentou limite de deformação com ponto de ϵ_1 próxima de 0,7. Ambas as curvas apresentam os pontos de deformação mínima em ϵ_2 próxima de -0,2 e um ponto de deformação máxima em ϵ_2 próxima de 0,5.

$$A_{\text{hemisférico}} = \int_{-0,2}^{0,5} (-1,0499 \epsilon_1 + 1,1848) d\epsilon \quad (\text{PETG}) \quad (\text{A})$$

Ahemisférico = 0,7189 ua

$$A_{\text{hemisférico}} = \int_{-0,2}^{0,5} (-0,0185 \epsilon_1 + 0,70) d\epsilon \quad (\text{PVC}) \quad (\text{B})$$

Ahemisférico = 0,4881 ua

Analisando o resultado das integrações das duas equações (A e B) obtemos a diferença das áreas sob as duas curvas (PETG e PVC) um valor de 0,2308 ua, que corresponde a 32,16% em favor ao PETG, o que significa um aumento de capacidade nos ensaio de tração, Erichsen e estampagem incremental, mantendo os mesmos parâmetros envolvidos nos ensaios: velocidade de avanço, velocidade de avanço em profundidade, ângulos de estampagem e profundidade do passe vertical. Essa diferença de 32,16% para material PETG, representa maior capacidade de se deformar numa situação de estampagem comparado com polímero PVC.

4. CONCLUSÃO

PETG apresentou os melhores resultados de falhas em relação ao PVC, onde a falha da trinca circunferencial surgiu no PVC, porém a falha deformação por enrugamento e a falha da trinca circunferencial com a falha de enrugamento ao longo da espessura da parede ocorreram somente na chapa polimérica PETG, demonstrando que este material polimérico possui maior conformabilidade.

O processo de estampagem incremental de polímeros PETG e PVC, utilizando chapas com dimensões de 140 x 140 mm, espessura de 2,0 mm, ferramenta de conformação de 8 mm de diâmetro, com ângulo máximo da peça, que foi de 45° e profundidade de até 38,2 mm para PETG, sendo que para a chapa polimérica PVC não foi possível realizar a conformação, o mesmo se rompeu antes dos 25mm de profundidade. Conclui-se que a chapa polimérica PETG é a mais indicada para a estampagem incremental, conseguindo obter melhores resultados que a chapa polimérica PVC.

No gráfico do diagrama de limite de falha, PETG e PVC foi realizado um levantamento das duas curvas de limite de falha- CLF, analisando o resultado das integrações de duas equações, obtemos uma diferença das áreas sob as duas curvas CLF (PETG e PVC) um valor de 0,2308 ua, que corresponde a 32,16% em relação ao PETG, o que representa maior capacidade de se deformar em relação ao polímero PVC.

AGRADECIMENTO

A Deus pela benção, vida e esta oportunidade.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes e, ao meu co-orientador, Prof. Manolo Lutero Gipiela, pelas valiosas discussões, apoio e confiança depositados durante a realização deste trabalho.

Aos Professores Amauri Viana, Cheng Te Chuan e Maurílio Rufini pela ajuda incondicional nos ensaios realizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] ALLWOOD, J. M., BRAMLEY, A. N., Ridgman, T. W., MILEHAM, A. R. A Novel Method for the Rapid Production of Inexpensive Dies and Moulds with Surfaces Made by Incremental Sheet Forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2005: 323-327p.
- [2] Ashby M., Johnson K.; Materials and Design- The art and science of material selection in product design; Elsevier (2006).
- [3] CASTELAN, Jovani, DALEFFE, Anderson, SCHAEFFER, LÍrio, CASA GRANDE, Joeci, GRUBER, Vilson, FRITZEN Daniel. Development of Cranial Implant Through Incremental Sheet Forming for Medical Orthopedic Applications. International Journal of Materials Engineering and Technology (Pushpa Publishing House). (2010): 63-80p.
- [4] CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L. Tese de Doutorado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2010, 152p.
- [5] DALEFFE, Anderson. Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro. Dissertação de Mestrado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2008. 84p.
- [6] Duflou J.R., Verbert J., Belkassen B., Gu J., Sol H., Henrard G., Habraken A.M. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008: 253-256p.
- [7] Franzen V, Kwiatkowski L, Neves J, Martins PAF, Tekkaya AE. On the capability of single point incremental forming for manufacturing pvc sheet parts. ICTP-2008, International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea; 2008.

- [8] Franzen V., Kwiatkowski L., Martins P.A.F., Tekkaya A.E., Single point incremental forming of PVC, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 462-469.
- [9] Hussain G., Dar N.U., Gao L., Chen M. H. A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming. *Journal o Materials Processing Technology*. p. 98-94, 2007.
- [10] HUSSAIN, G., GAO, L., HAYAT, N., ZIRANA, X. A new formability indicator in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009: 4237-4242p.
- [11] JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G., BRAMLEY, A., DUFOU, J., ALLWOOD, J. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 88-114 2005.
- [12] MARQUES, Tânia Alexandra Ferreira - Estampagem Incremental de Polímeros. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2010, 109p.
- [13] SENA, JOSÉ ILÍDIO VELOSA D. Estampagem incremental: Um novo conceito de produção. Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, p. 102. 2009. Dissertação de Mestrado.
- [14] SILVA, M.B.; ALVES, L. M.; MARTINS, P. A. F. Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation. *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 29, p. 557-566, 2010.
- [15] SCHAEFFER, L. *Conformação de Chapas Metálicas*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p.
- [16] Smith, William F., *Princípios de ciência e engenharia dos Materiais*, 5a edição, McgrawHill (1996).
- [17] SY, Lê Van. Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet. Tese de Doutorado, *Innovazione Meccanica e Gestionale*, Università degli Studi di Padova: Università degli Studi di Padova, 2009, 205p.

Capítulo 17

Obtenção e caracterização de um polímero composto com resíduos de MDF

Jailton Weber Gomes

Luiz Guilherme Meira de Souza

Carlos Roberto Rocha da Silva

Luiz Guilherme Vieira Meira de Souza

Abstract: O presente trabalho propõe a utilização de resíduos de MDF (Medium Density Fiberboard) em pó coletado em marcenaria como reforço / carga na fabricação de compósitos de matriz polimérica. As matrizes empregadas foram a resina poliéster teraftálica e ortoftálica. Será estudado o processo de obtenção e caracterização dos compósitos avaliando as propriedades mecânicas (resistência à tração e flexão), propriedades térmicas (condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico) e grau de cristalinidade do compósito (difração de Raios-X). Para tanto, fabricaram-se amostras de compósitos nas frações em massa de 0, 10, 15 e 20% de adição de resíduo às resinas poliéster ortoftálica e teraftálica. A adição de resíduo às matrizes poliéster de maneira geral interferiu negativamente nas propriedades mecânicas e nível de cristalinidade e, em termos de resistência térmica do compósito foi demonstrada competitivo com a matriz. Demonstrou-se, portanto, que os agregados de resíduos de MDF têm a função de carga, mas quando se considera o aumento do módulo de elasticidade para todos os compósitos fabricados pode-se considerar que tal resíduo ofereceu reforço.

Keywords: MDF, compósitos poliméricos , propriedades mecânicas, difração de raios-x, , propriedades térmicas.

1 INTRODUCTION

Destinar de forma sustentável os rejeitos industriais e domésticos visando diminuir seu impacto ao ambiente natural é uma obrigação de toda a humanidade. Por este motivo, nos últimos anos, estudos relacionados à melhoria da eficiência de processos produtivos e aproveitamento de rejeitos, tanto industriais quanto domésticos, apontam soluções simples que reduzem o descarte aleatório desses materiais no ambiente natural como rios e aterros sanitários.

O crescimento do mercado imobiliário impulsionados por programas do Governo Federal estimulou também o crescimento do setor moveleiro nos últimos anos. Com isso, a utilização de MDF (Miduim Density Fiberboard) como matéria prima na fabricação de móveis prontos e planejados tem se popularizado devido suas características mecânicas que muito se assemelham com a madeira natural (Gomes, 2014).

Nos últimos anos o MDF (chapas de fibras de média densidade) tem-se popularizado como matéria prima na fabricação de móveis prontos e planejados e aplicação em peças na construção civil e de decoração. A diversificação no seu uso vem gerando significativa quantidade de resíduos que, embora muitas vezes seja aproveitada para alguns fins específicos, pode se constituir em problema de gestão ambiental das empresas (Infraestrutura, 2011).

Destinar corretamente os resíduos sólidos da indústria moveleira seja reaproveitando-o ou aplicando tratamento adequado para seu posterior descarte é um problema que preocupa a sociedade humana nos últimos anos. Estudos apontam como uma das utilidades desses refugos, servirem como matéria prima para fabricação de chapas de aglomerado e/ou geração de energia (KOCH, 2012).

A aplicação de tecnologias apropriadas e ambientalmente adequadas, com a redução da utilização de recursos naturais, do desperdício, da geração de resíduos e poluição, é uma necessidade nas indústrias do setor moveleiro. Aliado a tal necessidade os materiais compósitos podem se apresentar como uma alternativa no aproveitamento desses resíduos (Nascimento, 2009).

Os compósitos surgem da necessidade de aplicação de materiais que possuem propriedades específicas, e estas não são encontradas nos metais, polímeros e cerâmicas. Busca-se no compósito a leveza dos polímeros, a resistência dos metais e a capacidade térmica dos materiais cerâmicos. Podemos nos compósitos agregar as melhores características de cada material em um único (Gomes, 2014).

Este artigo apresenta o estudo de caracterização de compósitos poliméricos formulados com duas matrizes poliéster distintos; resina poliéster ortoftálica e teraftálicas; usadas para fabricação e manutenção de piscinas de fibra de vidro utilizando como elemento modificador das propriedades mecânicas e térmicas o resíduo de MDF em pó (Fig. 1) originados de máquinas de corte de chapas de MDF.

Figura 1. Resíduo de MDF em pó.

2 EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

Os seguintes materiais foram utilizados no experimento:

- Matriz ou fase 1 - resina poliéster ortoftálica (cristal) e teraftálica (escura). Tal escolha se deu pela facilidade de aquisição em mercado local e baixo custo de aquisição;
- Resíduo de MDF ou fase 2 – pó fino coletado em marcenaria local como mostra Fig.1;

- Como iniciador de cura - peróxido metil-etil-cetona, MEK-P ativador de reação para resina poliéster escolhida;
- Desmoldante - cera de carnaúba para facilitar retirada das amostras do molde;
- Prensa hidráulica - capacidade de 5 Ton;
- Molde – concebido em ferro fundido com dimensão 200mmx200mmx15mm e volume total e 480 ml.
- Recipientes para mistura – garrafas PET coletadas após descarte.

2.2 PROCEDIMENTOS PARA FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO

Adotou-se 1 g de compósito equivalente a 1 ml do volume do molde utilizado para fabricação das amostras com o objetivo de facilitar o procedimento experimental. Considerando que o volume total do molde corresponde a 480 ml, produziu-se 10% à mais em massa de compósito com o objetivo de preencher totalmente o molde e garantir prensagem do compósito. Para cálculo do volume considerou-se 12 mm de espessura para as placas que darão origem as amostras para ensaios, assim, a massa total formulada foi de 528 g.

O procedimento de obtenção e preparação do compósito se deu forma manual, sem auxílio de máquinas. A seguir, a sequência sugerida para desenvolvimento da fase experimental representado pela Fig.2:

Figura 2. Diagrama de obtenção dos corpos de prova.

Retirada de materiais indesejáveis no resíduo de MDF – utilizou-se uma peneira granulométrica em aço inox, MESH/TYLER 9 com abertura de 2mm;

Preparação do molde – o molde deve ser previamente revestido com cera de carnaúba sendo indispensável que a cera seque totalmente antes da adição do compósito;

Separação das porções de resíduo – com o auxílio de uma balança semianalítica as porções 10%, 15% e 20% em massa de resíduo foram separadas;

Separação das porções de resina – utilizando balança semianalítica as porções 90%, 85% e 80% em massa de resinas foram separadas;

Adição de MEK-P – antes de acrescentar o resíduo a resina adiciona-se 1,5% em massa em relação a quantidade de resina empregada misturando-se por 1 minuto;

Adição do resíduo – após catalise adiciona-se o resíduo em pequenas porções para garantir melhor homogeneidade;

Prensagem – antes de prensar é necessário aguardar o tempo de gel, em média 15 minutos após adição de MEK-P. O objetivo da prensagem é reduzir a presença de bolhas na amostra produzida. Não é necessário aplicar mais que 1,5 toneladas de força ao molde durante a prensagem;

Retirar molde da prensa – este procedimento pode ser realizado 3 horas após início da prensagem;

Retirar amostra do molde – deve-se aguardar o resfriamento total do molde.

Corte das amostras nas dimensões exigidas pelas normas vigentes.

2.3 AMOSTRAS

Após fabricação e cura das placas de compósitos, cortaram-se as amostras nas dimensões, apresentadas na Tabela 1, conforme exigência das normas vigentes sugeridas pela literatura para cada ensaio de caracterização.

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova

Ensaio	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Norma utilizada
Tração	250	25	8	ASTM D638
Flexão	250	25	8	ASTM D790
DRX	25	25	8	-----
Propriedades Térmicas	70	70	70	-----

A tabela 2 apresenta os compósitos formulados a partir das resinas poliéster ortoftálicas (cristal) e teraftálicas (escura).

Tabela 2. Nomenclatura dos compósitos e suas composições.

Adição (%)	Resina Poliester	
	Ortoftálica (Cristal)	Teraftálica (Escura)
0	C	E
10	C10	E10
15	C15	E15
20	C20	E20

Assim, os compósitos foram nomeados utilizando uma letra e um número de dois algarismos. A letra corresponde à matriz poliéster empregada e o número corresponde à quantidade de resíduo adicionado. Por exemplo, o compósito C10 é formado pela adição de 10% de resíduo a resina poliéster ortoftálica (cristal). Já o compósito E15, é formado pela adição de 15% de resíduo a resina poliéster teraftálica (escura).

2.4 CARACTERIZAÇÃO

Para efeito de caracterização foram empregadas as análises que seguem:

Ensaio Mecânicos - a máquina universal modelo WDW - 20 da série E 271 para ensaio de tração e flexão serviu para levantamento das características mecânicas (resistência à tração e flexão, módulo de elasticidade na tração e na flexão e alongamento total na tração e na flexão) do compósito proposto. Medidas dos corpos de prova estão apresentados na tabela 1.

Propriedades Térmicas – o analisador de propriedades térmicas KD2 Pro do fabricante Decagon Devices juntamente com o sensor SH-1 Dual Needle foi usado conforme manual do fabricante. Mediu-se: condutividade térmica, resistência térmica, calor específico e difusividade térmica. Medidas dos corpos de prova estão apresentados na Tb.1.

Ensaio de Difração de Raio-X (DRX)- Utilizou-se para medidas de difração de Raios-X o equipamento fabricado pela Shimadzu modelo XRD-7000. Medidas dos corpos de prova estão apresentados na Tab 1. Para calculo do índice de cristalinidade utilizou-se a Eq.1.

$$I_c \% = \frac{P_{(cr)} - P_{(am)}}{P_{(cr)}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

I_c = Índice de cristalinidade em porcentagem;

I_{cr} = Pico de intensidade de difração que representa o material cristalino (eixo y);

I_{am} = Pico de intensidade de difração que representa o material amorfo (eixo y);

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Tração

A Tabela 3 apresenta os resultados comparativos entre as medidas obtidas no ensaio realizado e os parâmetros cedidos pelo fabricante das matrizes empregadas para a obtenção do compósito. A Table 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos e matrizes poliméricas utilizadas.

Tabela 3 - Valores de parâmetros dos ensaios de RT medidos e obtidos do fabricante das matrizes utilizadas.

	Resistência a Tração		Alongamento Total		Módulo Elásticidade	
	(MPa)		(%)		(GPa)	
	Cristal	Escura	Cristal	Escura	Cristal	Escura
Medida	41,3	41,6	4,3	4,8	0,58	0,95
Fabricante	57,0	55,6	3,2	2,0	2,81	2,11

Analisando os resultados de resistência à tração (RT) medida exposto na tab. 3, observa-se que a RT foi bem inferior à apresentada pelo fabricante. Com relação a cristal o decréscimo foi de 27,5% e na escura foi de 25,2%. No alongamento total na tração (ATT), os valores medidos foram superiores aos apresentados pelo fabricante e com relação ao Módulo de Elásticidade (MET) houve comportamento idêntico a RT, ou seja, uma significativa diminuição.

Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos e matrizes.

Adição (%)	Resistência a Tração		Alongamento Total		Módulo Elásticidade	
	(MPa)		(%)		(GPa)	
	Cristal	Escura	Cristal	Escura	Cristal	Escura
0	41,34±1,8	41,56±1,4	4,27 ± 1,2	4,77 ± 1,3	0,58±0,11	0,95±0,12
10	21,56±1,1	29,40±1,3	3,45 ± 1,0	2,92 ± 0,8	0,93±0,06	1,34±0,12
15	18,18±1,2	21,45±1,1	2,82 ± 0,8	2,05 ± 1,6	1,00±0,14	1,47±0,18
20	17,06±1,7	18,57±1,5	2,21 ± 0,7	1,79 ± 1,2	1,19±0,09	2,19±0,17

Os resultados de RT, conforme tab. 3, não estão consonânticos com os fornecidos por alguns fabricantes de resina de poliéster. É importante mencionar que, por se tratar de um processo manual vários fatores podem interferir nos resultados obtidos, como aparecimento de bolhas, presença elevada de umidade e talvez o mais importante, a variação da concentração de estireno na resina adquirida.

De maneira geral, analisando a tab. 4, houve diminuição na resistência mecânica do compósito com o aumento na adição de resíduo. Mesmo comportamento se deu em relação ao ATT.

Baseado nos dados apresentados na Tab.4, observa-se que a adição de 10% resíduo de MDF aos compósitos de matriz ortoftálica e teraftálica causou menor alteração nas RT principalmente nos compósitos fabricados com resina escura. A diminuição na RT de E10 foi de 29% e C10 de 52 %, uma diferença de 36% entre os compósitos. Já quando se relacionam as matrizes na prática não houve variação de RT entre as mesmas.

Ainda conforme dados apresentados na Tab.4 observa-se que apenas a formulação C10 apresentou módulo de elasticidade (MOET) inferior a 1GPa. Esse resultado indica que o material possui baixa rigidez. As formulações restantes foram caracterizadas como rígidas, pois tiveram valores superiores a 1GPa. Durante o ensaio é possível observar que o material deforma pouco quando aplicado à força de tração, e também não se notou o surgimento do empençamento, evento característico de material dúctil.

Para as propriedades alongamento total e módulo de elasticidade (MOET) as perdas foram superiores a 50% e são maiores conforme se aumenta a concentração de resíduo ao compósito.

Os resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos C20 e E20 foram inferiores quando comparados ao compósito proposto por Hilling 2008. O material desenvolvido por Hilling utilizou como matriz o Polietileno de Alta Densidade com adição de 20% de resíduo de MDF (HDPE20) no qual se obteve resistência a tração média de 23,49 MPa. Em termos relativos o compósito C20 apresentou resistência à tração quase 40% menor quando comparado ao compósito HDPE20, e, para o compósito E20 esse redução foi de 26,5%.

3.2 ENSAIO DE FLEXÃO

Com o propósito de se obter a resistência a flexão, módulo de elasticidade na flexão e módulo de elasticidade na flexão, conforme ASTM D790, foram examinados cinco unidades de cada material compósito. As amostras foram colocadas em uma estufa a 80 graus Celsius durante 24 horas para a retirada total da umidade.

A Tabela 5 apresenta os resultados comparativos entre as medidas do ensaio e os parâmetros cedidos pelo fabricante das matrizes utilizadas para a obtenção do compósito.

Tabela 5 - Resultados comparativos entre as medidas do ensaio e os parâmetros cedidos pelo fabricante das matrizes utilizadas.

	Resistência a Flexão (MPa)		Módulo Elasticidade (GPa)	
	Cristal	Escura	Cristal	Escura
Medida	6,68±1,8	4,72±0,3	0,08±0,01	0,12 ± 0,02
Fabricante	84,4	69	2,81	0,07

Os valores da resistência flexão (RF) das matrizes utilizadas para a obtenção do compósito são insignificantes quando comparados aos valores apresentados por um dos fabricantes. Isso não aconteceu na RT. Pode-se supor que os valores apresentados pelo fabricante não são verdadeiros ou houve algum comprometimento dessa propriedade no lote da resina que foi a adquirida.

Observando-se os valores da RF e comparando-os a outros compósitos já estudados e apontados pela literatura percebe-se que os valores medidos para as matrizes utilizadas são compatíveis e às vezes até mais elevados, o que demonstra que não houve erros significativos nos ensaios de flexão realizados.

A Tabela 6 apresenta os valores médios dos parâmetros do ensaio de flexão realizados para cinco amostras de resinas e dos compósitos obtido com resíduos de MDF.

Tabela 6 - Resultado médios do ensaio de RF.

Adição (%)	Resistência a Flexão (MPa)		Alongamento Total (%)		Modulo Elasticidade (GPa)	
	Cristal	Escura	Cristal	Escura	Cristal	Escura
0	6,66±1,8	4,72±0,3	6,72 ± 1,6	39,63 ± 5,3	0,04 ± 0,01	0,02 ± 0,01
10	3,44 ±0,4	2,84±0,2	3,53 ± 0,5	1,89 ± 0,4	0,17 ± 0,02	0,04 ± 0,01
15	2,98±0,4	1,89±0,3	2,98 ± 0,5	2,29 ± 0,7	0,19 ± 0,02	0,08 ± 0,02
20	1,22 ±0,2	1,23±0,2	2,81 ± 0,8	2,08 ± 0,8	0,14 ± 0,03	0,17 ± 0,01

Conforme tab. 6 a resistência mecânica à flexão e alongamento total na flexão de todas as formulações do compósito foram inferiores aos da matriz correspondente. Esse fato indica que o resíduo funcionou apenas como carga no compósito. Mesmo assim tais características mostraram-se compatíveis a outros compósitos que utilizam fibras naturais como elemento modificador das propriedades mecânicas de matrizes poliéster. A resina cristal apresentou maior RF que a escura, com aumento correspondente a 46,6%.

Quando se avalia a rigidez dos compósitos estudados todas as formulações apresentaram maior rigidez quando comparadas às matrizes correspondentes, pois a adição de resíduo ao compósito aumenta a rigidez do material e consequentemente diminui seu alongamento total durante o ensaio de flexão. Esse fato é observado analisando o módulo de elasticidade na flexão (MOEF) cujos valores foram superiores aos apresentados pelas matrizes em resina cristal e escura.

A formulação do compósito que apresentou maior MEOF foi a que utilizou como matriz a resina escura, com supremacia para a formulação E20, que corresponde a 20% de adição de resíduo a resina escura.

3.3 ENSAIOS TÉRMICOS

A Tabela 7 apresenta os resultados de Calor Específico, Difusividade Térmica, Condutividade Térmica e Resistividade Térmica obtidos em análise térmica das amostras das matrizes, MDF e formulações dos compósitos.

Tabela 7 - Propriedades Térmicas dos Compósitos.

Material	C MJ/m ³ K (Calor específico)	D mm ² /s (Difusividade)	K W/mK (Condutividade)	R °C·cm/W (Resistividade)
Cristal	1,945 ±0,194	0,114 ± 0,011	0,221 ± 0,022	542,1 ± 54,2
C10	1,547 ± 0,155	0,111 ± 0,011	0,171 ± 0,017	583,2 ± 58,3
C15	1,561 ± 0,156	0,121 ± 0,012	0,189 ± 0,019	528,3 ± 52,8
C20	1,415 ± 0,141	0,112 ± 0,011	0,166 ± 0,017	604,2 ± 60,4
Escura	1,628 ± 0,163	0,096 ± 0,010	0,156 ± 0,016	641,2 ± 64,1
E10	2,021 ± 0,202	0,101 ± 0,010	0,204 ± 0,020	491,6 ± 49,2
E15	1,711 ± 0,171	0,124 ± 0,012	0,197 ± 0,020	506,5 ± 50,6
E20	1,763 ± 0,176	0,123 ± 0,012	0,217 ± 0,022	461,4 ± 46,1
MDF	0,770 ± 0,077	0,171 ± 0,017	0,132 ± 0,013	758,7 ± 75,9

O erro da medição foi de 10% conforme dados fornecidos no manual do fabricante.

Observando a tab. 7, a adição de resíduo às matrizes poliéster favoreceu às modificações das propriedades resistência térmica, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico. Algumas considerações podem ser feitas quando se analisa Tab.7:

- A resina escura apresentou menor calor específico, menor difusividade térmica, menor condutividade térmica e maior resistência térmica.
- A formulação do compósito com calor específico volumétrico mais baixo foi a C20;
- A difusividade da matriz de resina escura foi menor que a da cristal;
- A difusividade das formulações mais elevada foi a E15 e a mais baixa E10;
- A condutividade térmica das matrizes foi inferior a das formulações do compósito;
- A condutividade térmica da resina escura foi menor que a da resina cristal em 30%;
- A formulação com maior resistência térmica foi a C20;

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos no ensaio térmico e o grau de cristalinidade apresentados pelos compósitos.

Tabela 7 - Tabela resumo dos valores medidos do grau de cristalinidade, resistência térmica, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico.

Material	Grau de Cristalinidade %	C MJ/m ³ K (Calor específico)	D mm ² /s (Difusividade)	K W/mK (Condutividade)	R °C·cm/W (Resistividade)
Cristal	72,4	1,945	0,114	0,221	542,1
C10	71,6	1,547	0,111	0,171	583,2
C15	68,7	1,561	0,121	0,189	528,3
C20	66,6	1,415	0,112	0,166	604,2
Escura	74,1	1,628	0,096	0,156	641,2
E10	71,8	2,021	0,101	0,204	491,6
E15	71,3	1,711	0,124	0,197	506,5
E20	71,1	1,763	0,123	0,217	461,4
MDF	55,0	0,770	0,171	0,132	758,7

Examinando os dados obtidos nos ensaios térmicos e de DRX expostos na Tab.7, se observa a grande interferência do grau de cristalinidade dos compósitos nas propriedades térmicas. Os materiais com maior índice de cristalinidade foram às matrizes em resina cristal e escura e, estas apresentaram maior condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica. Já para a propriedade resistência térmica o comportamento observado acontece de maneira contrária a condutividade térmica, ou seja, com o aumento da cristalinidade do material a resistência térmica diminui. Este fato já era esperado já que a resistência térmica é uma propriedade inversa a condutividade térmica.

3.4 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.

Na análise de DRX, conforme Fig.2 e Fig.3, observou-se que o acréscimo de resíduo não promoveu mudança significativa no índice de cristalinidade dos compósito proposto. Nas mesmas figuras apresenta-se a faixa do ângulo Theta a ser observada nas amostras que correspondeu ao intervalo entre 10º e 60º theta.

Figura 3. Difratoograma Compósito C10, C15 e C20. Figura 4. Difratoograma Compósito E10, E15 e E20.

Baseado nas análises gráficas representadas na Fig.3e Fig.4, foram extraídos os resultados de cristalinidades dos materiais estudados e estes estão apresentados na Tab.8. O grau de cristalinidade foi calculado pelo método empírico de Segal descrito por Subramanian et. al. (2005) e calculado pela equação 12.

Tabela 8 - Resumo Geral índices de cristalinidade medidos por DRX.

Material	I _{cr} (u.a.)	I _{an} (u.a.)	2 θ I _{cr} em graus	2 θ I _{an} em graus	I _c (%)
Cristal	2160	596	20,3	40,2	72,4
C10	2026	578	20,8	37,0	71,6
C15	1880	588	21,5	43,3	68,7
C20	1670	558	22,1	40,6	66,6
Escura	2156	560	19,5	41,1	74,1
E10	2116	596	20,4	39,0	71,8
E15	2076	596	19,1	38,9	71,3
E20	2092	604	20,0	34,6	71,1

Diante dos resultados apresentados na Tab.8, de maneira geral a adição de resíduo promoveu diminuição no índice de cristalinidade dos compósitos fabricados. A variação máxima no nível de cristalinidade entre a resina cristal e o compósito de maior adição de resíduo (C20) foi de 8%. Comparando-se a matriz teraftálica ao seu compósito com maior adição de resíduo (E20) se teve uma redução de 4% no índice de cristalinidade.

A redução do índice de cristalinidade do compósito em relação à matriz de origem pode está associado ao aumento na adição de resíduo ao compósito, pois o resíduo apresenta índice de cristalinidade em torno de 55%, valor este inferior ao da matriz de origem que apresentam cristalinidades superiores a 70%. Assim, as formulações dos compósitos com maiores índices de cristalinidade foram E10 e C10, ou seja, os compósitos com menor adição de resíduo de MDF.

4 CONCLUSÕES

O compósito concebido apresentou viabilidade em relação à processabilidade devido a sua facilidade de manuseio, fabricação em temperatura relativamente baixa e por reduzir o uso de resina na composição do compósito;

Os ensaios realizados com as matrizes ortoftálicas e teraftálicas comprovaram a afirmação de Rebeiz (1995) sobre a supremacia nas propriedades mecânicas da resina teraftálica sobre a resina ortoftálica devido sua estrutura de formação reticulada;

Em geral o compósito mostrou-se viável para fabricação de peças e estruturas aplicáveis a sistemas onde baixos esforços mecânicos são solicitados, ou seja, o resíduo apresentou-se como carga;

A adição do pó de MDF, de maneira geral tende a enrijecer e fragilizar o compósito comprovados pelo aumento significativo no módulo de elasticidade, dessa forma podemos considerar o resíduo como reforço;

As resistências à tração dos compósitos formulados mostraram-se compatíveis a outros compósitos que utilizam fibras naturais como reforço ou carga;

As formulações produzidas com matriz em resina teraftálica tiveram melhores resultados de resistência à tração com supremacia para o compósito de formulação E10;

O alongamento total de todas as formulações dos compósitos apresentaram-se superiores aos da matriz polimérica;

Os compósitos formulados com resina cristal apresentaram maior alongamento total com hegemonia para o compósito C10, acontecimento já esperado já que a resina cristal pura apresentou alongamento total superior a matriz em resina escura;

Todas as formulações dos compósitos apresentaram módulo de elasticidade na tração superior aos das matrizes de resina cristal e escura, com supremacia para o compósito E20. As formulações dos compósitos que utilizou como matriz a resina escura apresentaram maior módulo de elasticidade na tração quando comparados aos compósitos formulados com resina cristal, esse comportamento já era esperado já que os resultados obtidos para a matriz pura mostraram-se superiores à amostra da resina cristal;

Observou-se que o aumento na adição de resíduos no compósito não promoveu mudança significativa no grau de cristalinidade sugerindo uma menor interferência na cristalinização e cura da resina, refletindo tal comportamento nas propriedades mecânicas analisadas;

Devido à grande capacidade de impregnação de resina ao resíduo sua adição máxima viável foi de 20% em massa, pois a partir desta concentração tornava-se difícil a homogeneização da mistura;

A resina teraftálica produziu melhores resultados de resistência mecânica. Quanto maior o grau ou nível de cristalinidade dos compósitos estudados maiores foram os valores apresentados pelas propriedades térmicas, exceto para resistência térmica que houve diminuição;

Considerando os benefícios ambientais e econômicos a formulação mais viável refere-se ao compósito E20.

REFERÊNCIAS

- [1] ASTM D638-03 – Standard test method for tensile properpies of plastic, 2003.
- [2] ASTM D790-10 - Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials, Philadelphia 2010.
- [3] Gomes, J. W., 2014. “Compósito polimérico a partir de resíduos de marcenaria para fabricação de um forno solar tipo caixa para assamento de alimentos”. Em Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – CBCIMAT2014. Cuiabá, Brasil;
- [4] Hillig, É.; SCHNEIDER, V. E.; PAVONI, E. T. Diagnóstico da geração de resíduos e dos sistemas de gestão ambiental das empresas do pólo moveleiro da serra Gaúcha. In: PÓLO moveleiro da serra Gaúcha: geração de resíduos e perspectivas para sistemas de gerenciamento ambiental. Caxias do Sul: Educs, 2004. 165p.
- [5] Infraestrutura, 2013. Feb. 2013 <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/06/minha-casa-minha-vida-2-traz-novidades-e-garante-r-125-7-bi-para-moradias-ate-2014>>.
- [6] Koch, M. R.: Gestão de Resíduos Sólidos de uma Industria de Aglomerados e Moveleira – Um Olhar para Sustentabilidade. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) – UNIVATES – Lajeado – RS.
- [7] Nascimento, Nirvana Cordeiro Do: Geração de resíduos sólidos em uma indústria de móveis de médio porte. Universidade de Ribeirão Preto – Dissertação de Mestrado. Ribeirão Preto, 2009.
- [8] Rebeiz, K.S, Fowler, D.W. Cement and Concrete Composites, v.17, p79 – 91, 1995.
- [9] Teixeira, M. G. Aplicação de Conceitos de Ecologia Industrial para Produção de Materiais Ecológicos: O Exemplo do Resíduo de Madeira. 2005. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) Universidade Federal da Bahia.

Autores

ADRIANO LIMA DA SILVA

Engenheiro de Materiais (UFCG, 2016), Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais (UFCG, 2018), Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (Conceito 5 CAPES), e Especialização em Engenharia da Qualidade pela FACULDADE ÚNICA DE IPATINGA - FUNIP (em curso). Bolsista / Pesquisador CAPES e Membro Atual do LabSMac - Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos - UFCG, Desenvolvendo Pesquisas no Âmbito de Catalisadores Cerâmicos Magnéticos Avançados para Obtenção de Biodiesel, Tem experiência na área de engenharia de materiais e metalúrgica, com ênfase em materiais Cerâmicos, bem como participação em trabalhos com materiais Poliméricos.

ALBERTO ERMANN DOS SANTOS SANSONE

Físico pela Universidade de São Paulo (2014) e mestre em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (2018).

ALEXSANDRA CRISTINA CHAVES

Possui graduação em Química pela Universidade Federal da Paraíba (2000), mestrado em Química pela Universidade Federal da Paraíba (2003) e doutorado em Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2009). Em junho de 2011 concluiu o primeiro pós-doutorado, em Campina Grande - Brasil, na Universidade Federal de Campina Grande, na área de Materiais Cerâmicos, sendo o projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico, o mesmo teve como objetivo o Desenvolvimento de Membranas Cerâmicas para Tratamento. Desenvolveu o segundo pós-doutorado na área de Materiais Cerâmicos, que teve como objetivo a Obtenção de Argilas Organofílicas Através de Tensoativo não Iônicos Visando Usos em Fluido de Perfuração de Base não Aquosa, Cargas Nanométricas em Matrizes Poliméricas e Usos em Outras Bases Orgânicas. Atualmente é professor(a) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Santa Luzia e compõe o corpo docente permanente do Programa de Mestrado Profissional em Educação Profissional e Tecnológica em Rede Nacional - ProfEPT do polo IFPB . Tem experiência na área de Educação, Química e Ciência e Engenharia de Materiais com ênfase em materiais cerâmicos.

ANDRÉ CANAL MARQUES

Designer de produto pela UNIJUÍ-RS, especialista em Expressão Gráfica pela PUC-RS. Mestre em Engenharia de Materiais pela UFRGS e Doutor em Engenharia de Materiais pela UFRGS e UPC - Universitat Politècnica de Catalunya. É professor dos Cursos de Graduação em Design de Produto, Design e Engenharia de Materiais na Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS. Coordena também a graduação tecnológica em Design de Produto e os Laboratórios da Indústria Criativa campus Porto Alegre. Tem experiência na área de Design e Engenharia de Materiais, com ênfase em Design de Produto e seleção de materiais, atuando principalmente nos seguintes temas: sustentabilidade, design e seleção de materiais, impressão 3d, educação, design estratégico, computação gráfica e biônica.

ANDRÉ SANDMANN

Possui graduação em Licenciatura em Matemática pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2003), mestrado em Modelagem Matemática pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (2009) e doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande (2013). Atualmente é professor efetivo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Tem experiência na área de Matemática, com ênfase em Matemática aplicada, atuando principalmente nos seguintes temas: produção de leite, modelo matemático, ensino-aprendizagem, programação linear e formação matemática.

ANTONIO DOS REIS DE FARIA NETO

Doutorando em Engenharia Mecânica - UNESP (2017 - 2022). Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais - UFAM (2017). Graduação em Engenharia Mecânica - UNESP (2015). Tem experiência em caracterização de aços avançados de alta resistência, corrosão em aços, técnicas eletroquímicas para caracterização de processos corrosivos, estruturas híbridas de aço e alumínio soldadas a laser e planejamento de experimentos.

ARMANDO SÁ RIBEIRO JÚNIOR

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Bahia (1991), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1995), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003) e pós-doutorado na Norwegian University of Science and Technology (2014-2015). Atualmente é professor Associado da Universidade Federal da Bahia e líder do Gitec - Grupo de Inovação Tecnológica da UFBA. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Análise de Tensões, atuando principalmente nos seguintes temas: análise não-linear utilizando o método dos elementos finitos, desenvolvimento de produtos, mecânica da fratura.

ARTUR CESAR DE FREITAS

Engenheiro de Materiais, com ênfase em Metalurgia pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Especialização em Engenharia de Operações Industriais pela mesma instituição; graduado em licenciatura em Matemática pela FACCAMP, mestre e doutorando em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/ USP.

BERNARDO LOHMANN GUIMARÃES

Possui ensino-médio-segundo-grau pelo Colégio Ponta grossense - Educação Infantil, Ensino Fundamental e Médio(2011). Possui graduação no curso de Engenharia Mecânica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa (2018). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica atuando principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento e tratamentos térmicos em ligas de alumínio. Atualmente exerce a profissão de Engenheiro Mecânico na indústria.

CARLOS BRUNO BARRETO LUNA

Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Possui aperfeiçoamento em Engenharia de Segurança do Trabalho (360 h) e Engenharia de Qualidade (360 h), sendo ambas pela Universidade Cândido Mendes (Rio de Janeiro). Tem experiência na área de engenharia de materiais e metalúrgica, com ênfase em materiais poliméricos, bem como participação em trabalhos com materiais cerâmicos tradicionais e biomaterial metálico. Atualmente mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFCG (Conceito Capes 5), desenvolvendo pesquisa de foto-oxidação de blendas poliméricas.

CARLOS ROBERTO ROCHA DA SILVA

Licenciado em Ciências com Habilitação em Matemática pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia(1987), Pós-Graduação em Matemática pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (2003), Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011); Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2015). Professor do INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA.

CELINA A A P ABAR

Possui graduação em Licenciatura e Bacharelado em Matemática pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Mestrado em Matemática pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Doutorado em Lógica Matemática pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Especialista

em Tecnologias Interativas Aplicadas à Educação (PUC/SP) em Design Instrucional para Educação On-Line (UFJF) e em Entornos Virtuales de Aprendizaje (OEI). Professora titular da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo atuando na Graduação, no Programa de Estudos Pós-Graduados em Educação Matemática da PUC/SP e em Curso de Extensão na COGEAE. Coordenadora da Implantação do Curso de Licenciatura em Matemática na Modalidade a Distância da PUC/SP no 1oSem/2009. Coordenadora do Instituto GeoGebra de São Paulo. Tem experiência na área de Educação a Distância, Tecnologia Aplicada à Educação, Webquest e Objetos de Aprendizagem. Editora das Revistas do Instituto GeoGebra de São Paulo e da Revista UNIÓN – Revista IberoAmericana de Educación Matemática.

CHENG TE HUNG

Possui Mestrado em Engenharia Mecânica pela UFPR, na área de concentração: Manufatura e Linha de Pesquisa: Engenharia de Materiais e Fabricação. Tem experiência profissional na área da Garantia da Qualidade na empresa EMBRACO – Empresa Brasileira de Compressores SA e Encarregado da Qualidade na empresa OMECO – Indústria e Comércio de Máquinas Ltda. Foi docente nos cursos técnicos em Mecânica Industrial, Eletromecânica e Mecatrônica do SENAI-CIC. Atualmente é Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI – CIC, Tecnólogo em Automação Industrial e Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

CRISTINA SAYURI FUKUGAUCHI

Professora Doutora do departamento de mecânica do Instituto Federal de São Paulo, IFSP - Campus São José dos Campos. Doutorado em Engenharia Mecânica - UNESP (2016). Mestrado em Engenharia Mecânica - UNESP (2010). Graduação em Engenharia Mecânica - UNESP (2007). Tem experiência nas áreas de Engenharia de Materiais e Metalúrgica com ênfase no processamento, na caracterização mecânica e na caracterização microestrutural de materiais metálicos, especialmente em aços avançados de alta-resistência, tais como aços multifásicos, aços TRIP e aços bifásicos aplicados na indústria automobilística.

DANIEL ALESSANDER NONO

Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil(2016). Aluno Pós-graduação - Doutorado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

DENISE MARTINHAGO

Graduada em Arquitetura e Urbanismo pelo Centro universitário Dinâmica das Cataratas (UDC) localizado no município de Foz do Iguaçu, Paraná e mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio (PPGTCA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Medianeira. Atualmente atua como arquiteta, urbanista, design de interiores e paisagista, com interesse em aprimoramento de conhecimento em suas áreas e nas áreas acadêmicas.

EDGARD POIATE JÚNIOR

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1998), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2001) e Doutorado pela PUC-Rio no Departamento de Engenharia Civil na área de Estruturas (2012). Atualmente é Engenheiro Sênior do Centro de Pesquisas (CENPES) da PETROBRAS, Professor Adjunto do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

ELISSON JOBBINS DE ARRUDA

Possui ensino médio-segundo-grau pelo Colégio Sant'Ana(2011). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica.

ELITA FONTENELE URANO DE CARVALHO

Possui graduação em Química Industrial pela Universidade Federal do Ceará (1978), mestrado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1992) e doutorado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (2004). Atualmente é Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Experiência na área de Engenharia de Materiais e Química com ênfase em Conversão, Enriquecimento, Fabricação de Combustível Nuclear, Tratamento de efluentes radioativos e convencionais e reaproveitamento de resíduos industriais e técnicas de caracterização química de materiais. Membro do Instituto Nacional de Tecnologia- INCT para Reatores Nucleares Inovadores.

EVERTON COIMBRA DE ARAÚJO

Possui graduação em Tecnologia Em Processamento de Dados pelo Centro de Ensino Superior de Foz do Iguaçu (2000), mestrado em Ciências da Computação pela Universidade Federal de Santa Catarina (2002) e doutorado (2013) em Engenharia Agrícola pela UNIOESTE (Cascavel), na área de Estatística Espacial de Área. Atualmente é professor efetivo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, atuando principalmente nos seguintes temas: Desenvolvimento Web com Java e .NET, Persistência de Objetos e Dispositivos Móveis. É autor de vários livros na área de desenvolvimento pela editora Visual Books e Casa do Código.

EWERTON DE OLIVEIRA TEOTÔNIO BEZERRA

Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Possui Aperfeiçoamento em Engenharia de Qualidade (360 h). Durante a graduação atuou em pesquisa de Fluidodinâmica computacional (CFD) voltada para fluidos petrolíferos e também atuou em pesquisa de degradação de blendas poliméricas, avaliando a influência no comportamento mecânico. Atualmente é mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), trabalhando com biomateriais poliméricos, especificamente no desenvolvimento de hidrogéis scaffolds a base de um derivado de taninos condensados para regeneração de tecidos. Também fez estágio nos laboratórios de pesquisa do Instituto de Tecnologia de Limerick, Irlanda (2018).

FERNANDA ARRUDA NOGUEIRA DA SILVA

Química Licenciada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005), Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ (2007) e Doutora em Química pelo Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro IQ/UFRJ (2011). Professora Classe C Nível 4 do Departamento de Química Inorgânica do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro em Regime de 40 h DE.

GELMIRES DE ARAÚJO NEVES

Possui graduação em Engenharia de Minas pela Universidade Federal da Paraíba (1984), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1989) e doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2002). Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em cerâmica, atuando principalmente nos seguintes temas: reciclagem de resíduos, materiais e componentes de construção, processamento de materiais cerâmicos, argilas organofílicas para uso em fluido de perfuração e cargas nanométricas, caracterização de matérias-primas cerâmicas. Coordena e participa de projetos financiados pelo CNPq, FINEP e FAPESQ. Atualmente, já publicou 351 trabalhos em anais de congressos e periódicos nacionais e internacionais. Orientou 83 alunos de conclusão de curso, iniciação científica, mestrado e doutorado. Na parte administrativa foi Chefe do Departamento de Engenharia de Materiais, Membro do Colegiado Pleno da UFCG, Coordenador do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Membro da Câmara de Pós-Graduação da UFCG.

GERALDO JOSÉ BELMONTE DOS SANTOS

Possui Doutorado em Modelagem Computacional pelo Laboratório Nacional de Computação Científica - LNCC, mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS e Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Bahia - UFBA. É, atualmente, professor da Universidade Estadual de Feira de Santana. As áreas de atuação são: Modelagem Matemática e Computacional de Problemas de Engenharia, Método dos Elementos Finitos, Mecânica dos Sólidos e Estrutural, Dinâmica Estrutural, Projeto e Análise de Sistemas Mecânicos e Inovação Tecnológica.

HIASMIM ROHEM GUALBERTO

Engenheira Mecânica e mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais ambos pelo Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ/UERJ)

HUGO ALEXANDER MARTINS PEREIRA

Mestrando em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial pela UFSC, é graduado em Engenharia Civil (PUCPR) e especialista em Formação Pedagógica do Professor Universitário e Didática do Ensino Superior (PUCPR). Atualmente é Professor do Centro Universitário UNIFACEAR na área de Engenharia de Transportes e Infraestrutura para o Curso de Engenharia Civil e Engenheiro Civil do Departamento de Transportes da Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba (COMEC). Possui experiência com didática no ensino superior e formação de professores, gestão e planejamento de trânsito e transportes, além de acumular experiências com gestão de projetos na Construção Civil.

ISABEL CHRISTINA FRANCO SILVA

Graduação em Engenharia Química pela Universidade do Vale do Paraíba, Brasil(2016). Professora da Escola Estadual Profº. Francisco Lopes de Azevedo

ISIS ANDREA VENTURINI POLA POIATE

Possui graduação em Odontologia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2000), especialização em Endodontia pela PUC-Rio (2004), mestrado em Odontologia (Clínica Odontológica) pela Universidade Federal Fluminense (2005), doutorado em Odontologia (Materiais Dentários) pela Universidade de São Paulo (2007), pós-doutorado em Física pela Universidade de São Paulo (2009). Atualmente é Professora Adjunta de Graduação e Pós-Graduação stricto Sensu da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal Fluminense.

JAILTON WEBER GOMES

Graduação em Tecnologia Elétrica pelo CEFET-BA em 2002, Especialista em Sistemas de Automação Industrial pela UNIFACS em 2004, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRN em 2009 e 2015, respectivamente. Atualmente Professor do Instituto Federal da Bahia Campus Camaçari desde 2007. Professor das Disciplinas de Automação I e II, e Eletrotécnica II do curso técnico de Eletrotécnica.

JANAINA FERNANDA MARCOLIN

Possui graduação em Licenciatura em Matemática pela Faculdade de Ensino Superior de São Miguel do Iguaçu, pós-graduação em Informática Instrumental Aplicada a Educação pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pós graduação em Educação Especial com ênfase em Transtornos Globais de Desenvolvimento (TGD) e Altas Habilidades pela Faculdade de Educação São Luís, pós graduação em Educação do Campo pela Faculdade de Educação São Luís. e mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio (PPGTCA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira. Já atuou como professora de

Matemática no Ensino Fundamental II, Ensino Médio e no EJA. Atualmente busca aperfeiçoamento em sua área e em áreas acadêmicas.

JANAINA PEREIRA MENDES

Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté

JHONATAN PERES DE SOUSA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA (2014) e mestrado em Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais - PPGEM/IFMA (2019). Atuou como Professor/Instrutor técnico na Instituição NETCOM- Treinamentos e Soluções Tecnológicas (2014-2018) e cursa Licenciatura em Formação Pedagógica para Bacharéis – EPT pelo IFMA/UAB. Atualmente se dedica a estudos sobre a avaliação de inibidores verdes de corrosão em sistema com fluxo turbulento por técnicas eletroquímicas de Potenciometria, Polarização Potenciodinâmica, Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, FTIR e análises por Fluidodinâmica Computacional (CFD).

JOÃO VITOR REGO MUNIZ

É graduado no Bacharelado em Ciência e Tecnologia, e graduando do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Maranhão. Também é aluno do curso de especialização em Engenharia de Produção na Universidade Estadual do Maranhão. Trabalhou com estudos sobre a utilização de resíduos orgânicos para geração de energia aplicado ao restaurante universitário do campus Dom Delgado da UFMA. Atualmente possui pesquisas sobre o uso de aditivos orgânicos em banhos de eletrodeposição de zinco e de análise do acabamento superficial em torneamento de aços AISI 52100.

JOSY ELIZIANE TORRES RAMOS

Possui Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (2004), Mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (2008) e atualmente desenvolve seu trabalho de Doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Adsorção, atuando principalmente nos seguintes temas: adsorção de compostos sulfurados, transporte e armazenamento de gás natural, cromatografia, novos materiais a base de carvão ativado e biotecnologia. Atualmente é Professora na Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA de Química aplicada para Engenharias, com ênfase em corrosão e ciência dos materiais.

KAIQUE MOREIRA MATOS MAGALHÃES

Possui graduação em Engenharia Civil e é aluno do Programa de Mestrado em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal da Bahia (UFBA), faz parte do GITEC - Grupo de Inovação Tecnológica da UFBA, desenvolvendo projetos de pesquisa e extensão. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia de Estruturas, Projeto Estrutural, Análise Estrutural, Análise de Tensões, Mecânica dos Sólidos e Mecânica Experimental. Atualmente é Professor Substituto do departamento de construção e estruturas da Universidade Federal da Bahia ministrando disciplinas relacionadas à teoria das estruturas.

LEOMAR OLIVEIRA DOS SANTOS

Está em formação no curso de Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), atualmente no 8º período. Trabalhou como auxiliar de processos na indústria de cimento portland Maré Cimentos Ltda., a MIZU. Possui experiência no processo de fabricação de cimento, bem como inspeção em filtros de mangas e medição de vazão, temperatura e ponto de orvalho nas chaminés dos filtros.

LETÍCIA NORONHA DA SILVA

Técnica em Química e aluna do curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LIRIO SCHAEFFER

Engenheiro Mecânico, Doutorado em Conformação Mecânica - Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule/Aachen/Alemanha (1982). Desde 1976 é Professor Titular na Universidade Federal do Rio Grande do Sul? UFRGS - Departamento de Metalurgia e coordena o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), atuando principalmente nas seguintes áreas: forjamento, estampagem, metalurgia do pó, materiais biomédicos. Tem experiências na área de Energias Alternativas. Atualmente é consultor ad hoc da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), consultor do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

LUANA DE LUCCA DE COSTA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade SATC (2012) e mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014). Atualmente é pesquisadora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Fabricação Mecânica, com ênfase em Conformação Mecânica de materiais ferrosos.

LUCIANO AUGUSTO LOURENÇATO

Realizou Mestrado (2001), Doutorado (2008) e Pós-Doutorado (2009) em Engenharia dos Materiais e Processos de Fabricação pela Universidade Estadual de Campinas. Possui graduação em Tecnologia no curso Processos de Fabricação pela Faculdade de Tecnologia de Sorocaba - FATEC (1997). Também realizou um mastere em Concepção, Mecânica e Meio Ambiente na Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Metiers (ENSAM) na França (2002). Foi professor assistente da Faculdade de Tecnologia Mecânica (FATEC) de Mogi Mirim - SP por um ano e meio. Atualmente é professor Associado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica atuando principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento de ligas de alumínio, processamento do material no estado semi-sólido, tixo-conformação, soldagem de materiais e análise de ciclo de vida de produto.

LUIZ GUILHERME VIEIRA MEIRA DE SOUZA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2015) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2019). Atualmente é prof. do ensino básico, técnico e tecnológico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

MANOLO LUTERO GIPIELA

Possui Doutorado em Engenharia Mecânica pela UFPR e Pós-Doutorado pela mesma instituição. No Doutorado estudou a expansão de furos em aço AHSS e no Pós-Doutorado estudou estampagem incremental de aço HSS. Quanto a sua experiência profissional, atuou na indústria automotiva (Renault do Brasil S.A.), indústria ceramista (American Glass Products do Brasil) e na indústria metal-mecânica (Magius Metalúrgica Industrial S.A.). Foi docente nas seguintes IES paranaenses na cidade de Curitiba: UTFPR, Faculdade Ensitem e Faculdade de Tecnologia SENAI - CIC. Atualmente, o Prof. Manolo faz parte do corpo docente do curso de Engenharia Mecânica da UFPR como professor substituto na disciplina de Metrologia e Instrumentação.

MARCELO DOS SANTOS PEREIRA

Professor Doutor do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Livre - Docência em Propriedades Mecânicas dos Materiais - UNESP (2004). Doutorado em Engenharia Mecânica - UNICAMP (1998). Mestrado em Engenharia Mecânica - UNESP (1992). Graduação em Engenharia Mecânica - UNESP (1988). Foi Diretor da Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá - UNESP (2012 - 2016). Assessor de Relações Externas da UNESP, desde janeiro de 2017. Tem experiência nas áreas de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Engenharia Mecânica e Engenharia Aeroespacial, com ênfase no processamento, na caracterização mecânica e na caracterização microestrutural de materiais metálicos.

MARIA DO CARMO DE ANDRADE NONO

Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil(1990). Pesquisador Titular III do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MARIA ELIZIANE PIRES DE SOUZA

Professora da Universidade Federal do Maranhão, graduada em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas no ano de 2000. Concluiu o mestrado e o doutorado na Faculdade de Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas, 2002 e 2006 respectivamente, na área de Engenharia de materiais. Possui experiência na área de tratamentos de superfícies para metais, anodização e revestimentos orgânicos. Também possui experiência na área de biomateriais no que diz respeito à corrosão de implantes metálicos, caracterização por técnicas eletroquímicas através de normas ASTM.

MARIANA LAGNIER AZEVEDO

Possui graduação em Engenharia de Materiais pelo CEFET-MG(2016) . Atualmente é mestranda da Universidade Federal do Rio Grande do Sul na área de Fabricação Mecânica, com ênfase em Conformação Mecânica.

MARILI MOREIRA DA SILVA VIEIRA

Doutora em Educação (Psicologia da Educação) pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Mestre em Educação (Psicologia da Educação) pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Graduada em Pedagogia pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, com habilitação em Orientação Educacional, e Administração Escolar. Atualmente é professor assistente doutor I, professora no Programa de Pós Graduação em Educação, Arte e História da Cultura da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Atua como Pró-Reitora na pró-reitoria de Graduação e Assuntos Acadêmicos, sendo responsável por toda a parte pedagógica da Graduação presencial e on-line. Tem experiência na área de Educação, com ênfase em Formação de Professores e Gestão Pedagógica, atuando principalmente com os seguintes temas: formação de professores, identidade profissional, projeto político pedagógico, processos de ensino e aprendizagem.

MICHELANGELO DURAZZO

Graduação em Engenharia Metalúrgica pelo Instituto Mauá de Tecnologia (1979), Mestre em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1986) e Doutorado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (2001). Atualmente é pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, no cargo de Gerente Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento do Centro do Combustível Nuclear. Experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando nas áreas de tecnologia de fabricação de combustíveis nucleares, cerâmicos e compósitos, técnicas de caracterização física de materiais, desenvolvimento de processos metalúrgicos para reaproveitamento de resíduos sólidos industriais e desenvolvimento de novos materiais. Coordenação de projetos de pesquisa. Membro do Instituto Nacional de Tecnologia- INCT para Reatores Nucleares Inovadores

MÔNICA CALIXTO DE ANDRADE

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1992), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1994) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999). Atualmente é professor adjunto - UERJ / IPRJ.

PATRICIA DA SILVA SANTOS

Graduanda em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Técnica em Mineração(2012), Técnica em Segurança do Trabalho (2018) pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba . Tem experiência na área de Gestão Ambiental.

PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES

Possui pós-doutorado pela Universidade de Deakin, em Geelong, na Austrália (2007) e Universidades da Califórnia em San Diego (1996) e Pennsylvania (1996) nos EUA. Obteve seu doutoramento em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) tendo sido parcialmente desenvolvido na Universidade de Birmingham/Inglaterra (1995). Obteve o mestrado em Engenharia Mecânica (1991) e a graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1989). Atualmente é professor Titular na Universidade Federal do Paraná atuando na graduação e pós-graduação (mestrado e doutorado) do Departamento de Engenharia Mecânica. Tem experiência na área de Processos de Fabricação/Conformação, atuando principalmente nas áreas de estampagem de chapas, ferramentas de conformação (matrizes e moldes), simulação computacional e metrologia.

PEDRO MARTINS DA ROCHA

Engenheiro de Produção e mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais pelo Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ/UERJ)

PRISCILA SCHROEDER CURTI

Possui graduação em Química pela Universidade Estadual de Maringá, PR, (2000), mestrado em Química pela Universidade Estadual de Maringá, PR, (2003) e doutorado na área de Química pela Universidade Federal de São Carlos, SP, (2007), com concentração em Físico-Química. Tem experiência na área de Química de Materiais, com ênfase em Química de Polímeros. Já atuou nos seguintes temas: PET, PNIPAAm, degradação da borracha natural, estudos cinéticos da despolimerização do PET pós-consumo. Atuou no setor de Pesquisa e Desenvolvimento em uma indústria farmacêutica na área de revestimentos poliméricos para aplicação na liberação controlada de fármacos. Realizou pós-doutorado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, atuando em pesquisas de membranas de quitosana modificadas para a liberação controlada de fármacos. Atuou como docente no Departamento de Química da Universidade Federal de Ouro Preto, MG, entre 2010 e início de 2013. Atualmente é professora associada, nível I, do Departamento Acadêmico de Química Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina.

RAFAEL MENEZES NUNES

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2006), mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul com período sanduíche na Universität Bremen(2008). Fez doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul com período sanduíche na Universität Bremen(2012) atuando em processos de Conformação Mecânica e engenharia de distorção. Atualmente é professor adjunto A da UFRGS. É professor colaborador e orientador de Mestrado no PPGE3M - UFRGS. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, controle de tensões residuais em processos de fabricação.

RENATA LOPES GONÇALVES DE SOUZA

Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil(2015). Bolsista de Mestrado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

RICARDO LUIZ DE SOUZA

Possui graduação em Licenciatura em Química pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Câmpus Londrina (2016). Tem formação em técnico em controle ambiental, obtida pela UTFPR - Câmpus Londrina, em 2016. Durante a graduação, atuou em projetos de Iniciação Científica (IC) e de Conclusão de Trabalho de Curso (TCC), realizando estudos de eletrofição de soluções de blendas poliméricas de polímeros biodegradáveis, tais como PBAT, Ecovio e Quitosana com o PNIPAAm, um polímero termossensível e biocompatível, a fim de obter fibras. A análise morfológica dessas fibras eletrofiadas foi realizada por meio da análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

SÍLVIA INÊS MOMBACH

Técnica em Química e aluna do curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos

TATIANA LOUISE AVILA DE CAMPOS ROCHA

Graduada em Química Industrial (UFSM), com mestrado em engenharia dos materiais (PPGEM/UFRGS), doutorado em ciência dos materiais pelo PGCIMAT/UFRGS em parceria com a Universidade de Hannover, com ênfase em Materiais Poliméricos e Pós-doutorado (PGDesign/UFRGS), com foco no desenvolvimento de microcápsulas para o desenvolvimento de produtos de maior valor agregado. Atua nas áreas de desenvolvimento, engenharia, design e seleção de materiais, com foco em materiais poliméricos. Nos últimos anos tem atuado em projetos de pesquisa e desenvolvimento de curto e longo prazo em parcerias entre universidades/centros de pesquisa (UFRGS, CETEPO, DIK, Universidade de Massachussets) e é coordenadora dos cursos de Engenharia de Materiais e Engenharia Biomédica.

UBIRAJARA CARNEVALE DE MORAES

Pós-Doutorado em Educação Matemática pela PUC-SP. Doutorado em Engenharia Elétrica (área de concentração em Engenharia da Computação) pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Bacharel e Licenciado em Matemática pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Especialização em Inovação e Gestão da EAD (USP). Especialização em Planejamento, Implementação e Gestão da EAD (Univ Federal Fluminense). Especialização em Análise de Sistemas (Mackenzie). Especialização em Didática do Ensino Superior (Mackenzie). Extensão Universitária em Análise de Sistemas (FAAP). Extensão Universitária em Gerência de Projetos (Mackenzie). Graduação em Curso Superior de Processamento de Dados pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, graduação em Licenciatura Plena para o Currículo do Ensino de 2º Grau pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Coordenador dos cursos de Especialização em Gestão de Projetos e Tecnologia Educacional. Atuando principalmente nos seguintes temas: Computação e linguagens de programação, Ambientes Virtuais de Aprendizagem, Informática Aplicada à Educação, Tecnologia Educacional, Ensino online e metodologias ativas. Pesquisa o uso das TICs no processo Ensino-aprendizagem tanto no Ensino Superior (UPM) como no Ensino Fundamental (Colégio Dante Alighieri). Coordenador de Produção de Materiais Didáticos para os cursos EaD da UPM. É autor dos livros: Basic I, Basic II, Basic Projetos, Tecnologia Educacional: o uso dos Recursos Educacionais no Processo de Ensino e Aprendizagem e Ética na Sociedade do Conhecimento.

VERA LUCIA ANTONIO AZEVEDO

Possui graduação em Matemática/Física pela Faculdade de Filosofia Campos - RJ. Graduação em Administração de Empresas pela Faculdade de Ciências Contábeis e Administrativas-Cachoeiro do Itapemirim. Graduação em Pedagogia pela Faculdade Campos Salles Mestrado em pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Doutorado em Educação pela Pontifícia Universidade Católica. Professora adjunto e Coordenadora do curso de Matemática da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Tem experiência na área de Matemática, com ênfase em Educação Matemática, atuando principalmente nos seguintes temas: Matemática, Educação, Prática de Ensino e Novas Metodologias no Ensino da Matemática. Atualmente desenvolvendo pesquisa junto ao Programa de Pós-doutorado em Educação Matemática da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo.

Agência Brasileira do ISBN

ISBN 978-85-7042-121-0

9 788570 421210