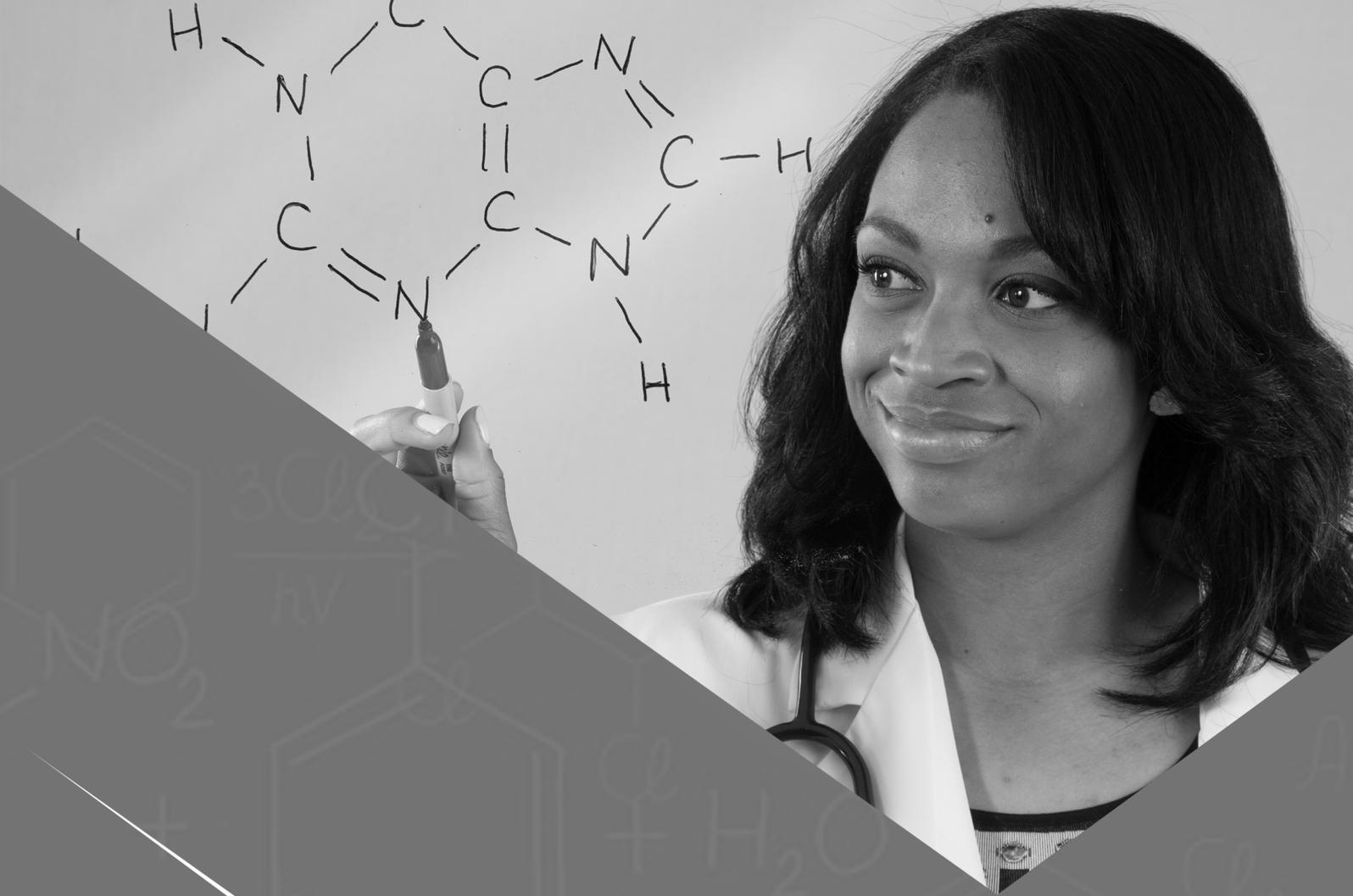


Atena
Editora
Ano 2020

Carmen Lúcia Voigt
(Organizadora)

Atividades de Ensino e de Pesquisa em Química 2



Atena
Editora
Ano 2020

Carmen Lúcia Voigt
(Organizadora)

Atividades de Ensino e de Pesquisa em Química 2

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Geraldo Alves

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie di Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Prof^a Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^a Dr^a Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof^a Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A872 Atividades de ensino e de pesquisa em química 2 [recurso eletrônico]
/ Organizadora Carmen Lúcia Voigt. – Ponta Grossa, PR: Atena
Editora, 2019. – (Atividades de Ensino e de Pesquisa em
Química; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-929-5

DOI 10.22533/at.ed.295201701

1. Química – Pesquisa – Brasil. I. Voigt, Carmen Lúcia. II. Série.
CDD 540

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

O ensino é o processo de construção do saber com a apropriação do conhecimento historicamente produzido pela humanidade. A Química representa uma parte importante de todas as ciências naturais, básicas e aplicadas. O Ensino de Química contribui para formação de cidadãos conscientes, ou seja, ensinar Química com um intuito primordial de desenvolver a capacidade de participar criticamente nas questões da sociedade. A abordagem aplicada em sala de aula deve conter informações químicas fundamentais que forneçam uma base para participação nas decisões da sociedade, cômnicos dos efeitos de suas decisões.

Assim, este e-book possui vários trabalhos selecionados que abordam o Ensino de Química, utilizando metodologias e ferramentas facilitadoras do processo de ensino-aprendizagem. Além destes trabalhos, são apresentados neste volume Pesquisas em Química.

A pesquisa é o processo de materialização do saber a partir da produção de novos conhecimentos baseando-se em problemas emergentes da prática social. As pesquisas em Química abrangem diversas outras áreas do conhecimento, podendo estar relacionadas ao avanço tecnológico, otimização de técnicas e processos, melhoria de produtos, entre outros.

Este e-book traz para você leitor uma oportunidade de aperfeiçoar seus conhecimentos em relação ao Ensino de Química e às Pesquisas em Química, fortalecendo ações de ensino-aprendizagem para aplicação em sala de aula, assim como abrindo novos horizontes sobre sínteses, processos e propriedades de produtos para aplicação em benefício da sociedade e meio ambiente.

Bons estudos.

Carmen Lúcia Voigt

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
BARALHO DA TABELA PERIÓDICA: CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO E APRENDIZAGEM DAS PROPRIEDADES PERIÓDICAS DA TABELA PERIÓDICA	
João M. L. Rocha Francisco C. S Neto Thaylon R. Silva Ruan R. C Nascimento Elismar A. Brito Roosman Q. Barreira Endyorry B. Oliveira Tatiani da Luz Silva	
DOI 10.22533/at.ed.2952017011	
CAPÍTULO 2	14
JOGO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA FACILITADORA DO ENSINO DE QUÍMICA PARA ALUNOS DO 3º ANO DO ENSINO MÉDIO	
Amanda Resende Torres Maria Rosa Galvão Pires Neta Rosana Mendes de Matos Privado	
DOI 10.22533/at.ed.2952017012	
CAPÍTULO 3	27
FLUORESCÊNCIA: EM BUSCA DE UM APRENDIZADO MAIS DINÂMICO E COMPREENSÍVEL	
Jailson Silva Damasceno Nazaré Souza Almeida Ziran Cardoso Balieiro Adriana Lucena de Sales Emmanuele Maria Barbosa Andrade	
DOI 10.22533/at.ed.2952017013	
CAPÍTULO 4	35
QUÍMICA DOS CARBOIDRATOS: ESTUDO DAS FUNÇÕES BIOLÓGICAS E ASSOCIAÇÃO COM O BEM ESTAR COMO PROPOSTA DE ENSINO	
Jailson Silva Damasceno Nazaré Souza Almeida Manoela dos Santos Assunção Adriana Lucena de Sales	
DOI 10.22533/at.ed.2952017014	
CAPÍTULO 5	44
UTILIZAÇÃO DO GÊNERO PALAVRAS CRUZADAS NO ENSINO DE QUÍMICA GERAL	
Natália Eduarda da Silva, Natali Eduarda da Silva Felipe Ferreira da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.2952017015	

CAPÍTULO 6	48
PRODUÇÃO DE PAPEL INDICADOR ÁCIDO-BASE A PARTIR DO EXTRATO DE REPOLHO ROXO	
Diego Rodrigues de Carvalho Caroline França Agostinho Yasmin Paiva da Silva Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.2952017016	
CAPÍTULO 7	60
MANUSEIO E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS QUÍMICOS: DIAGNOSTICANDO CONHECIMENTOS	
Juracir Francisco de Brito Angélica de Brito Sousa Laisse Cristine de Sousa Darlisson Slag Neri Silva Hudson de Carvalho Silva Jardel Meneses Rocha José Milton Elias de Matos	
DOI 10.22533/at.ed.2952017017	
CAPÍTULO 8	72
PERFIL DE LEITORES NO CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO (UFMA) – CAMPUS GRAJAÚ	
Maria Rosa Galvão Pires Neta Amanda Resende Torres Camila Jorge Pires Rosana Mendes de Matos Privado	
DOI 10.22533/at.ed.2952017018	
CAPÍTULO 9	81
SÍNTESE E FATORES QUE AFETAM O COMPORTAMENTO ASSOCIATIVO DE POLÍMEROS TERMOVISCOSIFICANTES	
Nívia do Nascimento Marques Rosângela de Carvalho Balaban	
DOI 10.22533/at.ed.2952017019	
CAPÍTULO 10	100
SÍNTESE DE COMPOSTOS HÍBRIDOS CHALCONAS-DIPIRIDINONAS VIA REAÇÃO DE HUISGEN	
Eduardo Bustos Mass Dennis Russowsky	
DOI 10.22533/at.ed.29520170110	
CAPÍTULO 11	113
ESTUDO DA PRODUÇÃO DE CELULASES POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO UTILIZANDO CASCA DE CACAU E BAGAÇO DE CANA COMO SUBSTRATO	
Isabela NascimentoTavares Ferreira Viviane Marques de Oliveira Iara Rebouças Pinheiro	
DOI 10.22533/at.ed.29520170111	

CAPÍTULO 12 123

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MICROESFERAS DE QUITOSANA: UM ESTUDO PARA LIBERAÇÃO DE FÁRMACOS ANTI-INFLAMATÓRIOS

Maria Helena de Sousa Barroso
Michelle Lemes Pereira
Karla da Silva Malaquias

DOI 10.22533/at.ed.29520170112

CAPÍTULO 13 140

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE BIOCAMPÓSITOS À BASE DE QUITOSANA E HIDROXIAPATITA PARA APLICAÇÕES NA ENGENHARIA TECIDUAL ÓSSEA

Adonias Almeida Carvalho
Ricardo Barbosa de Sousa
Jean Claudio Santos Costa
Mariana Helena Chaves
Edson Cavalcanti da Silva Filho

DOI 10.22533/at.ed.29520170113

CAPÍTULO 14 151

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS FABRICADOS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS VIA ESTUDOS REO-CINÉTICOS

Michelle Leali Costa
Mirabel Cerqueira Rezende
Edson Cochieri Botelho

DOI 10.22533/at.ed.29520170114

CAPÍTULO 15 166

DECOMPOSIÇÃO DE FOSFONATOS: USO COMO INICIADORES CATALÍTICOS DE POLIMERIZAÇÃO

Rafael O. Figueiredo

DOI 10.22533/at.ed.29520170115

CAPÍTULO 16 172

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS DOS ÁCIDOS HÚMICOS E SEUS EFEITOS EM PLANTAS

Tadeu Augusto van Tol de Castro
Débora Fernandes da Graça Mello
Orlando Carlos Huertas Tavares
Thainá Louzada dos Santos
Danielle França de Oliveira
Octavio Vioratti Telles de Moura
Hellen Fernanda Oliveira da Silva
Anne Caroline Barbosa de Paula Lima
Tamiris Conceição de Aguiar
Lucas de Souza da Silva
Raphaella Esterque Cantarino
Andrés Calderín García

DOI 10.22533/at.ed.29520170116

CAPÍTULO 17 189

ÓLEO ESSENCIAL DAS FOLHAS DE *Eugenia astringens* CAMBESS. ANÁLISE QUANTITATIVA (CG-EM) E POTENCIAL BIOLÓGICO

Alaide de Sá Barreto
Glaucio Diré Feliciano
Patrícia Reis Pinto
Taiane Borges Machado Silva
Marcelo Raul Romero Tappin
Rafaella Cruz de Azevedo Silva
Adélia Maria Belem Lima
Marcelo da Costa Souza.

DOI 10.22533/at.ed.29520170117

CAPÍTULO 18 201

PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MEMBRANAS ANISOTRÓPICAS POROSAS DE POLICARBONATO/SEPIOLITA

Nayara Conti Costa
Caio Marcio Paranhos

DOI 10.22533/at.ed.29520170118

CAPÍTULO 19 209

SECAGEM DE POLPA DE PITANGA - ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SECADOR POR ATOMIZAÇÃO COMPARATIVAMENTE AO SECADOR DE LEITO DE JORRO

Amanda Beatriz Monteiro Lima
Emanuelle Maria de Oliveira Paiva
Yuri Souza Araújo
Maria de Fátima Dantas de Medeiros

DOI 10.22533/at.ed.29520170119

CAPÍTULO 20 219

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILMES DE AMIDO/QUITOSANA ADICIONADOS DE ÁCIDO CÍTRICO

Renata Paula Herrera Brandelero
Alexandre da Trindade Alfaro
Evandro Martin Brandelero

DOI 10.22533/at.ed.29520170120

CAPÍTULO 21 227

PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTRUTURAIS DE FILMES À BASE DE ACETATO DE CELULOSE INCORPORADOS COM DIFERENTES ARGILAS

Pedro Augusto Vieira de Freitas
Taíla Veloso de Oliveira
Nelson Soares Júnior
Nilda de Fátima Ferreira Soares

DOI 10.22533/at.ed.29520170121

CAPÍTULO 22 238

ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA APLICADO ÀS CARACTERÍSTICAS DO RIO CACHOEIRA NO TRECHO ILHÉUS – ITABUNA NO ESTADO DA BAHIA: UMA DISCUSSÃO SOBRE MONITORAMENTO AMBIENTAL

Arthur Lima Machado de Santana

Alice Guerra Macieira Macêdo
Andreza Bispo dos Santos
Mauro de Paula Moreira

DOI 10.22533/at.ed.29520170122

CAPÍTULO 23 249

DETERMINAÇÃO DE CÁDMIO EM HORTALIÇAS COMERCIALIZADAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM DO PARÁ

Sara Emily Teixeira de Souza
Charles Miller de Souza Borges
Rafael Gonçalves Pontes
Kelly das Graças Fernandes Dantas

DOI 10.22533/at.ed.29520170123

CAPÍTULO 24 256

ANÁLISES DE PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS DE POLPAS IN NATURA DE “BACURI, CUPUAÇU E GRAVIOLA” COMERCIALIZADAS NOS MERCADOS MUNICIPAIS DE SÃO LUÍS - MA

Sayna Kelleny Peixoto Viana
Ítalo Prazeres da Silva
Isabel Azevedo Carvalho
Viviane Correa Silva Coimbra

DOI 10.22533/at.ed.29520170124

CAPÍTULO 25 267

DETERMINAÇÕES SENSORIAIS, FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE ÁGUAS DE BEBEDOUROS DO CAMPUS PAULO VI DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

Fabrcia Fortes dos Santos
Ítalo Prazeres da Silva
Vívian Freire Barbosa Penha Freire
Viviane Correa Silva Coimbra

DOI 10.22533/at.ed.29520170125

CAPÍTULO 26 278

QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DE CACHAÇAS ARTESANAIS E TIQUIRA COMERCIALIZADAS EM SÃO LUÍS-MA

Maria Laryssa Costa de Jesus
Ítalo Prazeres da Silva
Danilo Cutrim Bezerra
Nancyleni Pinto Chaves Bezerra
Viviane Correa Silva Coimbra

DOI 10.22533/at.ed.29520170126

SOBRE A ORGANIZADORA..... 289

ÍNDICE REMISSIVO 290

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS FABRICADOS EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS VIA ESTUDOS REOCINÉTICOS

Data de aceite: 05/12/2019

Michelle Leali Costa

Depto. de Materiais e Tecnologia – Faculdade de Engenharia – UNESP, Guaratinguetá – SP

Mirabel Cerqueira Rezende

Instituto de Ciência e Tecnologia/UNIFESP-São José dos Campos - SP

Edson Cochieri Botelho

Depto. de Materiais e Tecnologia – Faculdade de Engenharia – UNESP, Guaratinguetá – SP

O artigo apresentado a seguir é baseado em diversos estudos que os autores têm realizado na área de compósitos poliméricos e, especificamente, refere-se à palestra convidada apresentada pela Michelle Leali Costa, no 14º Congresso Brasileiro de Polímeros em Águas de Lindoia, SP; no Capítulo 4.2 do Livro: Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática, de autoria de Mirabel Cerqueira Rezende; Michelle Leali Costa; e Edson Cochieri Botelho; Editora Artliber, 2011 e no artigo publicado no Journal of Materials Science, "Monitoring of cure kinetic prepreg and cure cycle Modeling" v. 41, p. 4349-4356, 2006, dos mesmos autores.

RESUMO: Os compósitos poliméricos aeronáuticos podem ser produzidos por inúmeras formas, mas as mais utilizadas são via moldagem por compressão a quente ou em autoclave, onde as condições de processamento podem ser otimizadas a partir do conhecimento físico-químico da matriz polimérica. O comportamento cinético da reação de polimerização/cura ocorre concomitantemente às alterações na sua

reologia, sendo comum denominar o fenômeno de comportamento reo-cinético. Uma variedade de técnicas experimentais tem sido desenvolvida para acompanhar as reações de polimerização/cura de matrizes poliméricas, sendo as mais usadas as de análise térmica e as reológicas. A calorimetria exploratória diferencial (DSC) encontra diversas aplicações em diferentes indústrias, sendo utilizada na determinação da cinética de cura, do grau de cristalinidade, do ponto de fusão e da temperatura de transição vítrea (T_g) de polímeros, por exemplo. Já a análise reológica é utilizada na determinação de tempos e temperaturas de gelificação, vitrificação e viscosidade, entre outras. Com o objetivo de minimizar as perdas em componentes fabricados em compósitos, hoje de difícil reaproveitamento, devido às características da matriz polimérica e dos reforços, estudos têm sido realizados para entender a tecnologia de processamento de materiais compósitos. A etapa de polimerização/cura da matriz é um dos passos mais importantes no processamento de compósitos poliméricos. O uso inadequado de um ciclo de polimerização/cura pode acarretar na formação de regiões no laminado com distribuição heterogênea de resina/reforço, formação de vazios e microtrincas. A ocorrência destes defeitos pode comprometer o uso final de um componente, com o aumento de rejeitos de elevado valor agregado.

PALAVRAS-CHAVE: estudo reo-cinético; compósitos poliméricos; processamento

OPTIMIZATION OF AERONAUTICAL COMPONENT PROCESSING PROCESSING BY POLYMERIC COMPOSITES VIA REO-KINETIC STUDIES

ABSTRACT: Aeronautical polymeric composites can be produced in numerous ways, but the most commonly used are by hot compression molding or autoclave, where processing conditions can be optimized based on the physicochemical knowledge of polymeric matrix. The kinetic behavior of the polymerization/cure reaction occurs concomitantly with changes in its rheology, and this phenomenon is commonly named as reo-kinetic behavior. A variety of experimental techniques have been developed to accompany polymerization/curing reactions of polymeric matrices, the most used being thermal and rheological analyses. Differential scanning calorimetry (DSC) finds several applications in different industries, being used in the determination of cure kinetics, degree of crystallinity, melting point, and vitreous transition temperature (T_g) of polymers, for example. The rheological analysis is used in the determination of time and temperature of gelling and vitrification and viscosity, among others. In order to minimize losses in components made of composite, which today are difficult to reuse, due to the characteristics of the polymeric matrix and reinforcements, studies have been conducted to understand the technology of composites processing. The matrix polymerization/curing step is one of the most important in the processing of polymeric composites. Inadequate use of a polymerization/curing cycle can result in the formation of regions in the laminate with heterogeneous distribution of resin/reinforcement, formation of voids and microcracks. The occurrence of these defects may compromise the end use of a component, with the increase of tailings with high added value.

KEYWORDS: reo-kinetic study; polymeric composites; processing

1 | INTRODUÇÃO

A cura de uma matriz polimérica (resina) é um passo determinante na manufatura de compósitos termorrígidos reforçados com fibras. A qualidade dos compósitos é controlada em grande parte pelos parâmetros do ciclo de cura: tempo, temperatura e pressão, bem como pela adequada combinação desses fatores e do estabelecimento de sua sequência de utilização. Tradicionalmente, a manufatura de compósitos poliméricos apenas segue o ciclo de cura sugerido pelo fornecedor do pré-impregnado. Esse ciclo é geralmente determinado em uma situação ideal, onde a resina ainda está na condição de recém-sintetizada, condição essa que pode não ser representativa do estágio de cura da resina quando essa chega nas instalações onde ocorre a manufatura dos laminados ou dos componentes. Em geral, é aconselhável que o processador do compósito avalie em que estágio de cura se encontra a matriz polimérica, antes de finalizar a polimerização em autoclave ou em prensas. Isso é necessário para verificar a processabilidade do material e para otimizar os ciclos

de cura, especialmente se a resina tiver sido exposta à temperatura ambiente por muitas horas [Jang, 1994; Peters, 1998; Shin, Hahn, 2000].

Testes laboratoriais de processabilidade objetivam determinar como uma amostra se comporta durante um ciclo de manufatura simulado. Esses testes usam pequenas quantidades de material e, em equipamentos adequados, realiza-se uma programação de tempo e temperatura controlados a razões de aquecimento constantes, simulando as condições de cura em autoclave. A função do teste de processabilidade é conhecer as cinéticas de cura, os limites da estabilidade térmica e estabelecer ciclos de cura adequados, que levem à produção de compósitos poliméricos que atendam aos requisitos de qualidade e de desempenho final exigidos.

Nesse contexto, a análise térmica é muito utilizada para se estabelecer os mecanismos e as ordens de reação de cura de resinas poliméricas. As matrizes poliméricas são comumente classificadas em termos do seu limite de temperatura de processamento ou da sua temperatura de serviço, buscando sempre a sua maior estabilidade quando em serviço. As técnicas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e reologia estão entre as ferramentas mais importantes nos ensaios de processabilidade e os ensaios envolvendo essas técnicas são conhecidos como reo-cinéticos [Jang, 1994; Peters, 1998; Shin, Hahn, 2000; Ellis, 1993; Costa et al., 2005; Costa, Pardini, Rezende, 2005].

Os ensaios reo-cinéticos descrevem o grau de cura do sistema polimérico e indicam as temperaturas de início, máximo e final de cura. A função do estudo de processabilidade é encontrar a faixa ótima de processamento, que é resultante da adequada combinação do tempo e temperatura de processamento, pressão para consolidação, fluxo de resina e cura química do compósito laminado. Esses estudos de processabilidade devem vir sempre acompanhados por análises químicas apropriadas [Botelho, Rezende, Scherbakoff, 2002; Botelho, Nogueira, Rezende, 2002; Bretas, D'Avila, 2000; Botelho, Rezende, Scherbakoff, 2000; Costa et al., 2003; Lee, We, 2000; Phillips, Glauser, Manson, 1997; Costa et al., 2005b; Malek, 1992; Montserrat et al., 1995; Costa, 1998; Costa, Rezende, Almeida, 2001].

Um modelo cinético de cura adequado é crucial para identificar corretamente o calor gerado no processamento do compósito. No presente item, um modelo da cinética de cura é apresentado pelo estudo de um pré-impregnado de fibra de carbono/resina epóxi F161 e um ciclo de cura apropriado é proposto. A cinética de cura e o ciclo de cura apresentados foram baseados em um modelo cinético autocatalítico, que usa análises de DSC dinâmicas e isotérmicas e dados reológicos para determinar os parâmetros de interesse.

2 | EXPERIMENTAL

O material usado neste estudo foi o pré-impregnado de tecido de carbono/resina epóxi de código F161, fornecido pela empresa Hexcel Composites, disponível comercialmente. A resina epóxi desse sistema é resistente ao calor e possui uma boa condutividade térmica para ser curada em autoclave. É de cura a quente em temperaturas próximas a 177°C. É um sistema exclusivo de resina epóxi, sendo a primeira a atender a todos os requisitos de tipos e de classes da norma ML-R-9300 B.

2.1 Ensaios Reológicos

Os dados reológicos foram obtidos em um reômetro da Rheometric Scientific, modelo SR-5, com pratos paralelos e tensão controlada. Estes ensaios foram realizados para identificar mudanças nos perfis da viscosidade e nas temperaturas de gelificação (abreviação: gel) do sistema pré-impregnado estudado. Três razões de aquecimento foram estudadas: 2,5; 5,0 e 10,0 K.min⁻¹, na frequência constante de 1 rad.s⁻¹ e tensão de 1000 Pa. Com o objetivo de obter um ciclo de cura apropriado, três isotermas foram investigadas em 100, 110 e 120°C.

2.2 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As amostras de pré-impregnados (F161) não curadas, pesando cerca de 5 mg, foram colocadas em porta-amostras de alumínio, hermeticamente fechados e posicionados no lado oposto ao forno de referência do equipamento de DSC. As análises de DSC foram realizadas tanto no modo de aquecimento dinâmico como no isotérmico em um equipamento da PerkinElmer, modelo Pyris 1. Para os testes dinâmicos, quatro razões de aquecimento lineares (β) 2,5; 5,0; 8,0 e 10,0 K.min⁻¹ foram usadas ao longo da faixa de temperaturas de 30-300°C. Este procedimento visa determinar a cinética de cura do pré-impregnado. Experimentos isotérmicos foram também conduzidos em seis diferentes temperaturas (120, 125, 130, 135, 140 e 145°C), a fim de se obter o grau de cura e a extensão de cura em função do tempo. A reação foi considerada completa quando o sinal do equipamento retornou à linha de base.

3 | RESULTADOS

A processabilidade das resinas epóxis exige o conhecimento do comportamento reológico para determinar as propriedades do produto final e a cinética das reações de cura, com o objetivo de calcular a constante cinética aparente e a energia de ativação [Ellis, 1993; Costa et al., 2005; Costa, Pardini, Rezende, 2005; Botelho, Rezende, Scherbakoff, 2002].

A reação de cura de resinas epóxis normalmente envolve a reação do anel epóxi com o grupamento amina de uma determinada amina. Nos agentes de cura com terminação amina, cada hidrogênio em um nitrogênio amina é reativo e pode abrir o anel epóxi formando uma ligação covalente [Costa et al., 2005]. Quando o nitrogênio da amina contém dois hidrogênios, cada um reage com um anel epóxi diferente. A estrutura tridimensional do termorrígido vai se desenvolvendo dessa forma. Esse mecanismo se aplica tanto para os agentes de cura com aminas alifáticas como para os de aminas aromáticas. A reação entre os grupamentos epóxis e amina produz uma ligação C-N, que possui uma boa resistência ao meio, mas sua estabilidade a elevadas temperaturas é fortemente dependente da estrutura molecular adjacente na cadeia polimérica.

3.1 Análises Reológicas

A correlação entre viscosidade e temperatura ou viscosidade e tempo de análise de resinas termorrígidas ou de sistemas de pré-impregnados tem se mostrado adequado para o processamento de compósitos. O controle da viscosidade durante o processo de cura em autoclave permite a otimização da infiltração da resina por entre o reforço e viabiliza, conseqüentemente, uma maior compactação (consolidação) dos materiais compósitos em um tempo menor.

Os parâmetros de formação do gel, i.e., o tempo de gel e a temperatura de gel são dois fatores importantes para se estudar, pois são estas duas variáveis, tempo e temperatura, que podem aumentar ou diminuir a processabilidade do sistema termorrígido. Na literatura é difícil encontrar medidas a respeito das propriedades reológicas de sistemas termorrígidos, devido às possíveis variações que podem ocorrer no grau de reação, causadas durante uma estocagem inadequada, tempo de manuseio à temperatura ambiente ou pelo aquecimento gerado durante o processo de densificação/formação de ligações cruzadas na reação de cura.

A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam os parâmetros de viscosidade complexa (η^* - valor esse relacionado a uma propriedade reológica obtida em um sistema oscilatório, onde a viscosidade é dependente do módulo elástico (G') e do módulo viscoso (G''), obtido sob diferentes taxas de cisalhamento) para o pré-impregnado de tecido de carbono/epóxi F161, analisado nas razões de aquecimento de 2,5; 5,0 e 10,0 K.min⁻¹. Como pode ser observado, no início, o aumento da temperatura causa um pequeno efeito na viscosidade complexa. Esse ligeiro aumento no valor da viscosidade complexa no começo da análise é característico de uma ordenação lenta do sistema. Em seguida, ocorre um decréscimo da viscosidade até um ponto de mínimo. A partir desse ponto, a reação de polimerização toma lugar e um aumento na viscosidade complexa é observado, devido à formação de uma rede tridimensional de moléculas interligadas (região de gel). As análises reológicas do pré-impregnado

epóxi estudado mostram que esta resina analisada a 2,5 K.min⁻¹ apresenta uma reação de polimerização mais lenta que as amostras tratadas a 5,0 e 10,0 K.min⁻¹. Este comportamento é explicado pelo fato de ocorrer uma polimerização mais lenta do sistema epóxi, desse modo a reação realizada à razão de 2,5 K.min⁻¹ permite um melhor controle cinético do sistema.

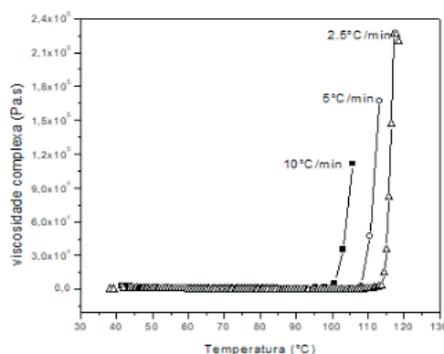


Figura 1: Variação da viscosidade complexa com o aumento da temperatura para o sistema epóxi do pré-impregnado F161.

Razão de aquecimento (K.min ⁻¹)	Parâmetros de viscosidade complexa			Módulos	
	$\eta_{\text{mínima}}$ (Pa.s)	$T_{\eta \text{ mínima}}$ (°C)	T_{gel} (°C)	$G' = G''$ (Pa)	T_{gel} (°C)
2,5	58	58	114	63972	116
5,0	241	60	107	53650	111
10	319	70	99	45467	103

Tabela 1: Parâmetros de viscosidade complexa do sistema epóxi do pré-impregnado F161.

A temperatura de gel pode ser obtida traçando-se uma tangente à curva de evolução da viscosidade complexa, caracterizada pelo aumento da densidade das ligações cruzadas no polímero. Nesse caso, a Tabela 1 mostra que o valor da temperatura de gel diminui com o aumento da razão de aquecimento para o sistema de pré-impregnado de resina epóxi.

Apesar de se poder acompanhar a temperatura de gel, observando-se os dados da evolução da viscosidade complexa na região de gel, é mais apropriado usar o cruzamento do parâmetro G' (módulo de armazenamento) com G'' (módulo de perda) para se obter os valores da temperatura e do tempo de gel. A Tabela 1 apresenta também esses resultados reológicos do pré-impregnado de resina epóxi F161. Similar às análises de viscosidade complexa, é observado que o valor da temperatura de gel, obtido pelo cruzamento de G' com G'' , diminui com o aumento da razão de aquecimento. Entretanto, a temperatura de gel obtida pela viscosidade complexa é menor, quando comparada com aquela obtida pelo cruzamento dos módulos de armazenamento e de perda.

Além disso, vale salientar que é muito importante aplicar a pressão no ciclo de cura na autoclave abaixo da temperatura de gel, com o objetivo de permitir uma boa molhabilidade do reforço. A temperatura apropriada pode ser determinada pelo estudo de curvas reológicas isotérmicas.

A Figura 2 apresenta as curvas reológicas isotérmicas do sistema de resina epóxi F161 obtidas a 100°C. Os valores de tempo de gel foram obtidos do mesmo modo que a temperatura de gel (pelo cruzamento de G' com G'' , na Figura 1, e pelo aumento da viscosidade complexa na Figura 3).

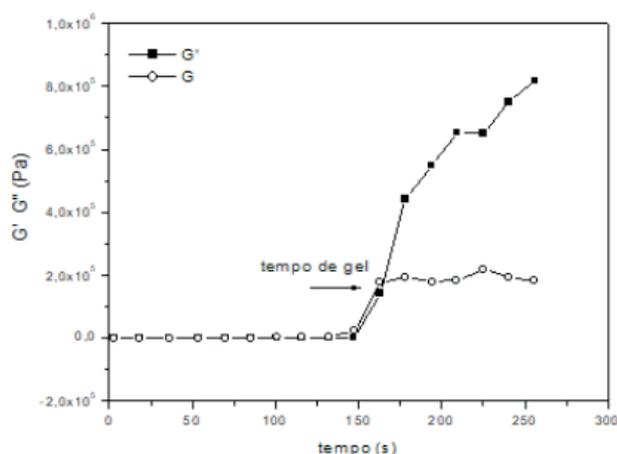


Figura 2: Isoterma a 100°C obtida por reologia do sistema de pré-impregnado F161.

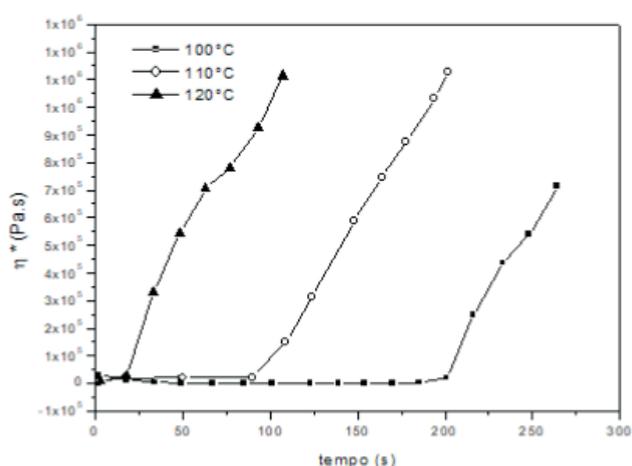


Figura 3: Isotermas reológicas do sistema de pré-impregnado F161.

Os tempos de gel do sistema de resina epóxi F161 obtidos nas temperaturas de 110°C e 120°C são, respectivamente, iguais a 85 e 40 s. Os resultados reológicos mostram um aumento na viscosidade complexa devido ao aumento da densidade das ligações cruzadas do sistema de resina (Figura 3). Entretanto, o valor do tempo de gel, do sistema epóxi analisado a 100°C foi mais longo que os valores encontrados a 110 e 120°C, sendo o mesmo igual a 135 s. As análises reológicas do sistema epóxi F161 mostram que a resina tratada termicamente a 110°C e 120°C apresenta uma reação de polimerização mais rápida que a amostra tratada a 100°C, aumentando a reticulação em um menor tempo. Consequentemente, a 110°C e

120°C, a probabilidade de formação de poros ou de vazios é maior, devido à maior probabilidade de aprisionamento de uma maior quantidade de voláteis no material polimerizado.

Mais uma importante observação é que usando uma razão de aquecimento de 2,5 K.min⁻¹, a temperatura mais adequada para aplicar a pressão no ciclo de cura na autoclave é de 100°C. Nesse ponto, o sistema de resina alcança o tempo de gel não tão rápido, mas também eficientemente, permitindo uma boa molhabilidade das fibras e uma cinética de polimerização apropriada como foi fornecido pelos resultados de DSC.

3.2 Análises de DSC

Para calcular a entalpia de reação total pertencente à conversão completa do sistema em resina epóxi curada, ΔH_0 , foram realizadas diversas varreduras dinâmicas no equipamento de DSC a diferentes razões de aquecimento. Repetidos experimentos foram feitos para cada razão de aquecimento. O valor médio obtido para cada razão de aquecimento é o que foi adotado. O valor correspondente para o sistema F161 foi de $\Delta H_0 = 49,4 \text{ J.g}^{-1}$. Esse valor é menor do que aquele apresentado na literatura, obtido no sistema de resina pura [Peters, 1998]. A temperatura de transição vítrea, T_g , para o material completamente curado é de 116,5°C.

A Figura 4 mostra curvas isotérmicas de DSC típicas de um sistema amina/epóxi em processo de cura. O que se observa inicialmente é o rápido aumento na taxa de reação com o aumento da temperatura da isoterma, seguido de um aumento exponencial na taxa e uma eventual diminuição da velocidade de reação até o término da mesma achei um pouco confuso. A área do pico exotérmico nas diferentes isotermas foi usada para determinar a conversão fracional da resina epóxi, assumindo que o calor de reação envolvido durante a cura é diretamente proporcional ao desaparecimento dos grupos epóxis.

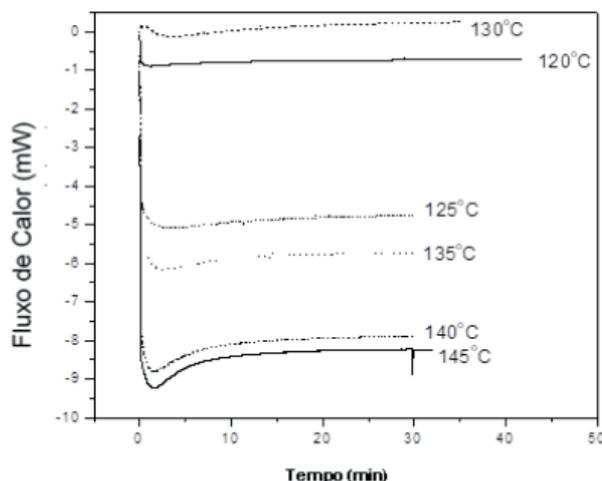


Figura 4: Isotermas obtidas no DSC a diferentes temperaturas para o sistema de pré-impregnado F161.

O valor da extensão da cura ou do grau de conversão, α , é normalmente obtido dividindo-se a entalpia total de reação ΔH_t envolvida no tempo t pela entalpia total ΔH_0 gerada durante toda a reação dinâmica ou obtida da literatura (Equação 1):

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_0} \quad (1)$$

Em termos gráficos, o valor de ΔH_0 é proporcional à área relativa ao pico da curva de DSC dinâmica. A representação analítica de tal processo de cura é normalmente estudada por meio de modelos existentes, como o de ordem n (Equação 2a) e modelos autocatalíticos (Equação 2b). Estes são:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n, \quad \text{para ordem } n \quad (2a)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^m \alpha^n, \quad \text{para reação autocatalítica} \quad (2b)$$

onde: α é o grau de conversão química, n e m são as ordens de reação, k é a velocidade de reação e da/dt é a derivada α em relação ao tempo. Desde que, o modelo autocatalítico é mais flexível para se adaptar aos vários dados cinéticos, este é usado no presente estudo para descrever a cinética de cura do sistema de pré-impregnado F161.

Os parâmetros da/dt são obtidos da razão dH/dT (calor de reação), no tempo t , da entalpia total, ΔH (Equação 3).

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{dH/dt}{\Delta H}, \quad (3)$$

onde: ΔH é a entalpia experimental, que corresponde à área total do pico representativo da reação ou da entalpia teórica encontrada na literatura.

A dependência da velocidade de reação k com a temperatura é comumente descrita pela equação de Arrhenius (Equação 4):

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4)$$

onde: R é a constante universal dos gases, T é a temperatura, E é a energia de ativação e A é o fator pré-exponencial.

Os parâmetros cinéticos nas análises cinéticas são obtidos seguindo a metodologia convencional, ou seja, m , n e k são calculados a diferentes temperaturas (120-145°C), por meio de regressão multilinear da Equação 5. A Equação 4 é usada pra determinar a energia de ativação (E) e o fator pré-exponencial (A). Os parâmetros cinéticos considerados na cura do pré-impregnado de tecido de carbono/epóxi F161

estão mostrados na Tabela 2.

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln k + n \ln(1 - \alpha) + m \ln \alpha. \quad (5)$$

A entalpia e a soma da ordem de reação aumentam com o aumento da temperatura das isotermas. A entalpia e a ordem reação estão relacionadas com a área da curva obtida pelo DSC, que, por sua vez, está diretamente relacionada com o desaparecimento dos grupos epóxis durante a cura.

A soma dos fatores exponenciais ($m + n$) é constante entre 1,2-1,9, uma ordem levemente maior que a ordem encontrada pelo modelo de ordem n e pelo método dinâmico, que está na faixa de 1,1 - 1,5. As entalpias de reação obtidas pelo método dinâmico, ΔH , variam na faixa de 45,6 - 52,7 J.g⁻¹, com o valor médio de 49,4 J.g⁻¹ para o pré-impregnado de carbono/epóxi F161. Os valores das entalpias de reação, obtidos usando o modelo autocatalítico e o método isotérmico, variam entre 44,9 – 46,6 J.g⁻¹. A média da energia de ativação, E_a , do sistema F161 é de 92,2 kJ.mol⁻¹.

Os valores obtidos para a constante pré-exponencial (~ 9 s⁻¹) e para a energia de ativação estão em concordância com os descritos na literatura para as reações entre grupos epóxis e aminas aromáticas (50 - 100 kJ.mol⁻¹) [Laza et al., 1998].

A maioria das propriedades finais de um compósito é obtida durante a cura da sua matriz polimérica. Durante o ciclo de cura, reações químicas ocorrem, o que causa a polimerização da matriz de resina que, por sua vez, está diretamente relacionada com as propriedades desejadas do material final. A cura da resina pode ser considerada a fase mais importante do processo de manufatura. Após a cura, uma considerável investigação deve ser feita no material compósito. Se a matriz não está propriamente curada, existe uma redução das propriedades mecânicas e térmicas do compósito, e quando isto é detectado o material é normalmente descartado. Nenhuma quantidade de trabalho após se proceder a cura pode garantir que uma parte incorretamente curada será utilizável, ou seja, atingirão as adequadas propriedades. Assim, a etapa mais crítica para se obter bons compósitos é o ciclo de cura.

Para monitorar a cura, modelos matemáticos são usados para prever o estágio real do sistema de resina. A previsão do estágio de cura da resina está relacionado com o grau de cura da resina, α_c , e pode ser modelado antes, durante e após o processo de cura. O grau de cura da resina indica o progresso da reação da resina a dadas condições de tempo e de temperatura. O sucesso de qualquer modelo de sistema de cura da matriz polimérica de um compósito depende da precisão da previsão do grau de cura a qualquer tempo.

Modelos de cura envolvem o estudo das reações de cinética de cura, correlação de propriedades físicas, e as análises das variáveis de cura. Muitas equações têm

sido usadas para descrever a extensão da reação, a velocidade de reação e a ordem de reação para vários sistemas termorrígidos [Laza et al., 1998; Wingard, 2000; Hayes, Gilbert, Seferis, 2000; He, 2001; Cascaval, Resu, Mustafa, 2001; Costa et al., 2003b]. Expressões teóricas e possibilidades gráficas, discutidas a seguir, estão disponíveis para prever o comportamento da matriz epóxi em função da temperatura de cura, tempo ou grau de cura.

Quatro etapas no ciclo de cura são usualmente sugeridas pelo fornecedor. Inicialmente, a temperatura é elevada da temperatura ambiente ($\sim 30^\circ\text{C}$) até 116°C à razão de $2,5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$; com um patamar de 60 minutos a esta temperatura (segunda etapa). Na terceira etapa a temperatura é elevada a 177°C utilizando-se a mesma razão de aquecimento e mantendo-se a essa temperatura por pelo menos 120 minutos (quarta etapa). A partir desta informação uma simulação matemática do grau de conversão da resina epóxi F161 foi desenvolvida e apresentada na Figura 5. Essa simulação é baseada no rearranjo das Equações 2a e 4, como segue:

$$\ln \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \ln A - E_a / RT + n \ln(1 - \alpha), \quad (6)$$

$$\int \frac{1}{(1 - \alpha)^n} \partial \alpha = \int A \cdot e^{-E_a / RT} \partial t. \quad (7)$$

Se $\alpha = 0$ e $t = 0$, a integração de uma constante também é zero.

Se $\alpha \neq 0$ tem-se:

$$-\frac{(1 - \alpha)^{(1-n)}}{(1 - n)} + C_1 = A \cdot e^{-E_a / RT} \cdot t + C_2, \quad (8)$$

ou

$$-\frac{(1 - \alpha)^{(1-n)}}{(1 - n)} + C_3 = A \cdot e^{-E_a / RT} \cdot t, \quad (9)$$

onde: C_1 e C_2 são constantes de integração, e C_3 é a solução de C_1 e C_2 :

$$t(\alpha) = (A \cdot e^{-E_a / RT}) \cdot \left[-\frac{(1 - \alpha)^{(1-n)}}{(1 - n)} + C_3 \right]. \quad (10)$$

Considerando-se $\alpha = 0$ e $t = 0$, tem-se:

$$C_3 = \frac{1}{(1 - n)} \quad (11)$$

Rearranjando as Equações 10 e 11 são obtidas as Equações 12 e 13:

$$t = \frac{1 - (1 - \alpha)^{(1-n)}}{A(1-n) \cdot \exp(-E_a / RT)} \quad (12)$$

$$\alpha = 1 - [1 - (1 - n) \cdot A \cdot t \cdot \exp(-E_a / RT)]^{1/(1-n)} \quad (13)$$

A Equação 13 foi usada em uma faixa de tempo e de temperatura pré-determinada [He, 2001; Cascaval, Resu, Mustafa, 2001] para obter a Figura 5, que apresenta as duas simulações do grau de conversão do sistema do pré-impregnado em função da temperatura. Primeiro, para um intervalo de tempo de 238,4 minutos; porque este é o tempo necessário para se elevar a temperatura de 30°C até 177°C, usando a razão de aquecimento de 2,5 K.min⁻¹, sugerida pelo fornecedor. A segunda curva foi representada pelo segundo intervalo de tempo de 238,8 minutos, relativo ao tempo necessário para se elevar a temperatura de 30°C até 177°C, utilizando a nova temperatura de patamar a 100°C (ao invés de 116°C), durante o ciclo de cura. A temperatura de 100°C foi escolhida baseada nas curvas reológicas. Nessa temperatura, o tempo do gel é atingido de maneira mais controlada do que em outras temperaturas avaliadas no presente estudo (110 e 120°C).

A Figura 5 mostra o grau de conversão do pré-impregnado de carbono/epóxi F161 em função da temperatura durante uma simulação do processo de cura desenvolvido na autoclave. Esta figura resume todos os passos descritos anteriormente e mostra a evolução da reação de polimerização em todo o ciclo de cura usado no processamento de compósitos poliméricos pelo uso de autoclave. Em ambos os ciclos de cura um elevado grau de conversão é observado, próximo de 100%.

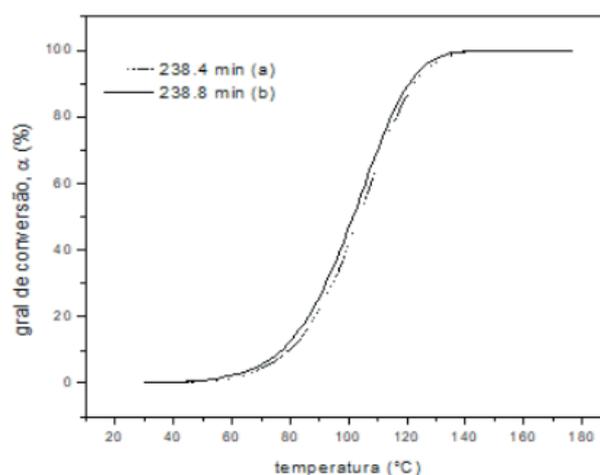


Figura 5: Grau de conversão total para o pré-impregnado de tecido de carbono-epóxi F161 em função da temperatura de cura usada na autoclave (a) sugerido pelo fornecedor (patamar a 116°C), (b) patamar a 100°C.

O desenvolvimento de modelos de cura permite utilizar recursos computacionais em apoio ao correto rastreamento e monitoramento de materiais em seu estado natural, avaliar o processo de cura durante o processamento e usar esses dados da

resina para prever os requisitos de cura de forma interativa mesmo durante o ciclo de cura.

3.3 Ciclo de Cura

Considerando-se que, o processamento de compósitos em autoclave envolve muitas etapas, tais como escolha do reforço e do sistema de resina polimérica, ciclos de vácuo/pressão, entre outras, o sistema de aquecimento deve considerar a temperatura de gel, razão de aquecimento e temperaturas inicial e final de polimerização. Quando esses parâmetros são considerados, as etapas de processamento de compósitos são executadas com segurança e produtividade. A correlação das informações reológicas com as obtidas por DSC permite estabelecer o ciclo de cura apropriado do sistema de pré-impregnado com o objetivo de produzir um material compósito que atenda aos requisitos de qualidade exigidos para aplicações estruturais, por exemplo. A Figura 6 apresenta os dois ciclos de cura discutidos neste estudo. Um obtido a partir dos resultados gerados neste estudo e o outro sugerido pelo fornecedor do pré-impregnado. Observa-se uma boa concordância entre os dois ciclos, com uma diferença somente na temperatura de aplicação do primeiro patamar isotérmico.

O benefício deste estudo está diretamente relacionado à área aeronáutica, onde um ciclo de cura inadequado pode ser prejudicial à produção de materiais destinados a aplicações em aeronaves.

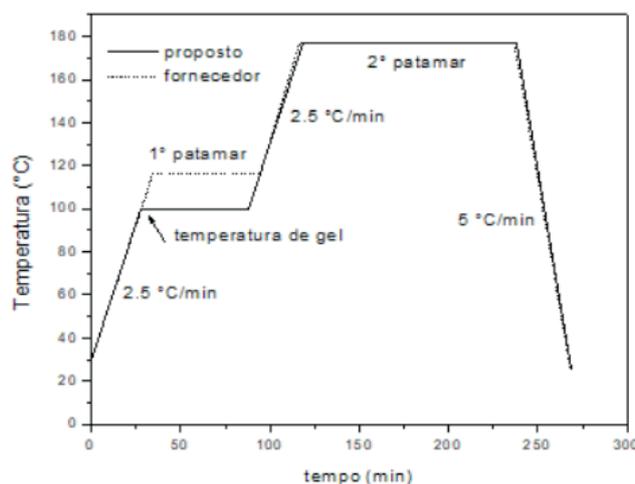


Figura 6: Ciclos de cura do sistema de pré-impregnado F161.

4 | CONCLUSÃO

Neste item é mostrado que análises por DSC e reologia são ferramentas importantes para delinear o comportamento de cura de sistemas pré-impregnados de resina epóxi, em particular, são apresentados resultados relativos ao estudo do sistema comercial denominado de F161. Logo, o domínio do uso dessas técnicas é

uma ferramenta que auxilia no estabelecimento e na otimização de ciclos de cura com o objetivo de produzir materiais compósitos com a qualidade exigida para componentes estruturais. No presente estudo foram detalhadas todas as etapas do estudo reo-cinético do pré-impregnado F161 com a determinação dos parâmetros de ciclo de cura mais apropriados, quais sejam, razão de aquecimento de $2,5 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$, a temperatura de 100°C como a mais adequada para se aplicar a pressão no ciclo de cura (por 1 h) e, a temperatura final de polimerização igual a 177°C (por 2 h). A comparação entre o ciclo de cura proposto neste estudo e o apresentado pelo fornecedor mostra uma boa concordância.

REFERÊNCIAS

- BOTELHO, E.C., NOGUEIRA, C.L., REZENDE, M.C.. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 86, p. 3114, 2002.
- BOTELHO, E.C., REZENDE, M.C., SCHERBAKOFF N.. **Polymer International**, v. 51, p. 1261, 2002.
- BOTELHO, E.C., REZENDE, M.C., SCHERBAKOFF, N.. **Materials Research**, v. 3, p. 19, 2000.
- BRETAS, R.E.S.; D'AVILA, M.A.. **Reologia de Polímeros Fundidos**, Publicações USP, São Paulo, Brasil, 2000.
- CASCAVAL, C.N.; ROSU; D.; MUSTATA, F.. **Thermochimica Acta**, v. 370, p. 105, 2001.
- COSTA, M.L.. Estabelecimento de parâmetros de processamento de compósitos estruturais por análises térmicas e viscosimétricas. Tese de Mestrado. ITA, São José dos Campos, SP, Brasil, 1998.
- COSTA, M.L.; BOTELHO, E.C.; L.C.; PARDINI; REZENDE, M.C.. **Journal of Materials Science**, v. 40(1), p. 3615, 2005.
- COSTA, M.L.; PAIVA, J.M.F.; BOTELHO, E.C.; REZENDE, M.C.. In: Proceedings do XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM, São Paulo, Brasil, 2003 .
- COSTA, M.L.; PAIVA, J.M.F.; BOTELHO, E.C.; REZENDE, M.C.. **Materials Research**, v. 8, p. 317, 2005b.
- COSTA, M.L.; PAIVA, J.M.F.; BOTELHO, E.C.; REZENDE, M.C.. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 13, p. 188, 2003b.
- COSTA, M.L.; PARDINI, L.C.; REZENDE, M.C.. **Materials Research**, v. 8, p. 65, 2005.
- COSTA, M.L.; REZENDE, M.C; ALMEIDA, S.F.M.. **Composites Science and Technology**, v. 61, p. 2101, 2001.
- ELLIS, B.. **Chemistry and Technology of Epoxy Resins**, Chapman and Hall, London, 1993.
- HAYES, B.S.; GILBERT; E.N.; SEFERIS, J.C.. **Composites: Part A**, v. 31, p. 717, 2000.
- HE, Y.. **Thermochimica Acta**, v. 367-368, p. 101, 2001.

JANG, B.Z. **Advanced Polymer Composites: Principles and Applications**, ASM International, USA, 1994.

LAZA, J.M.; JULIAN, C.A.; LARRAURI, E.; RODRIGUEZ, M., LEON, L.M.. **Polymer**, v. 40, p. 35, 1998.

LEE, C.L.; WEI, K.H.. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 77, p. 2149, 2000.

MALEK, J.. **Thermochimica Acta**, v. 200, p. 257, 1992.

MONTSERRAT, S.; FLAQUE, C.; PAGES, P.; MALEK, J.. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 56, p. 1413, 1995.

PETERS, S.T. **Handbook of Composites**, Chapman and Hall, London, 1998.

PHILLIPS, R.; GLAUSER, T.; MANSON, J.A.E.. **Polymer Composites**, v. 18, p. 500, 1997.

SHIN, D.D.; HAHN, H.T. **Composites part A: applied and manufacturing**, v. 31, p. 991, 2000.

WINGARD, C.D.. **Thermochimica Acta**, v. 357-358, p. 293, 2000.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aprendizagem 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 33, 35, 41, 42, 44, 45, 47, 63

Associações 81, 84, 88, 89, 94

Atcc8096 190

Atividade lúdica 11, 12, 22, 47

Avaliação da linearidade 190

B

Bioatividade 173, 174, 175, 177, 180, 182, 185

Biocompósito 140, 143, 146, 147, 149

C

Carboidratos 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 183, 257

Celulases 113, 114, 115, 116, 120, 121, 122

Chalconas 100, 101, 106, 107, 108, 110

Compósitos poliméricos 151, 152, 153, 162

Copolímero enxertado 81, 93

D

Diagnostico 60

Dihidropirimidinonas 100, 102, 103, 106, 107, 108

E

Ensino de química 1, 2, 7, 11, 14, 16, 17, 20, 22, 23, 25, 27, 28, 30, 33, 34, 35, 37, 38, 42, 44, 46, 47, 79, 255

Essential oil 190, 198, 199, 236

Estudo reo-cinético 151, 163

Eugenia astringens Cambess 189, 190, 191, 292

Extração de enzimas 113, 116, 117

F

Fermentação em estado sólido 113, 115, 116, 122

Fluorescência 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 89, 92, 176

Fosfonatos 166, 167, 168, 169, 170

G

Gc-ms 190, 199

H

Hibridização molecular 100, 104, 106, 108

Híbridos 100, 104, 105, 108, 110

Hidroxiapatita 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150

Homocedasticidade 190, 191, 192, 194

I

Indicador ácido-base 48, 51, 53, 58

Iniciadores catalíticos 166, 167, 168, 170

J

Jogo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25

Jogos didáticos 1, 2, 3, 6, 16, 18, 23

L

Laboratório 11, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 78, 81, 108, 140, 189, 198, 201, 243, 251, 255, 256, 260, 281, 289

Leitores 72, 73, 74, 75, 76

Leitura 8, 17, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 270

Licenciatura 4, 35, 72, 73, 74, 76, 78, 79, 270, 272, 273, 275, 276, 289

Lúdico 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 25, 34, 44

M

Massa molar 46, 47, 83, 88, 89, 90, 93, 128, 176, 203

Matéria orgânica 172, 173, 174, 175, 176, 178, 179, 185, 186, 187, 245

Modelo atômico de bohr 28, 29

P

Papel indicador 48, 51, 52, 53, 57, 58

Poliâmidas 166

Prática experimental 27, 28, 33, 35, 38

Processamento 66, 151, 153, 155, 162, 163, 164, 167, 201, 202, 206, 207, 258, 259, 263, 264, 265

Produtos químicos 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70

Q

Química dos alimentos 35, 36, 43

Quitosana 86, 90, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225

R

Repolho roxo 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59

Resíduos do cacau 113

S

Staphylococcus aureus 189, 190, 191, 192, 193, 199

Substâncias húmicas 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 180, 181, 182, 184, 185, 186, 187

T

Tabela periódica 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12

Termorresponsivo 81, 84, 93, 94

Teste citotóxico 190, 193, 197

Trichoderma 113, 114, 115, 122

