

Helenton Carlos da Silva  
(Organizador)

Estudos (Inter)  
Multidisciplinares  
nas Engenharias 2

Helenton Carlos da Silva  
(Organizador)

Estudos (Inter) Multidisciplinares nas  
Engenharias  
2

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 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 Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – 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. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

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 Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
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 Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
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  
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  
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

| <b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)<br/>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b> |  |
|---|--|
| E82   | <p>Estudos (inter) multidisciplinares nas engenharias 2 [recurso eletrônico] / Organizador Helenton Carlos da Silva. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.</p> <p>Formato: PDF<br/>Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader<br/>Modo de acesso: World Wide Web<br/>Inclui bibliografia<br/>ISBN 978-85-7247-701-7<br/>DOI 10.22533/at.ed.017190910</p> <p>1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. I. Silva, Helenton Carlos da.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p> |
| <b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>   |  |

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

A obra “*Estudos (Inter) Multidisciplinares nas Engenharias*” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora, em seu I volume, apresenta, em seus 21 capítulos, discussões de diversas abordagens acerca da importância da (inter) multidisciplinaridade nas engenharias.

O processo de aprendizagem, hoje em dia, é baseado em um dinamismo de ações condizentes com a dinâmica do mundo em que vivemos, pois a rapidez com que o mundo vem evoluindo tem como chave mestra a velocidade de transmissão das informações.

A engenharia praticada nos dias de hoje é formada por conceitos amplos e as situações a que os profissionais são submetidos mostram que esta onda crescente de tecnologia não denota a necessidade apenas dos conceitos técnicos aprendidos nas escolas.

Desta forma, os engenheiros devem, além de possuir um bom domínio técnico da sua área de formação, possuir domínio também dos conhecimentos multidisciplinares, além de serem portadores de uma visão globalizada.

Este perfil é essencial para o engenheiro atual, e deve ser construído na etapa de sua formação com o desafio de melhorar tais características.

Dentro deste contexto podemos destacar que uma equipe multidisciplinar pode ser definida como um conjunto de profissionais de diferentes disciplinas que trabalham para um objetivo comum.

Neste sentido, este livro é dedicado aos trabalhos relacionados aos estudos da (inter) multidisciplinaridade nas engenharias, com destaque mais diversas engenharias e seus temas de estudos.

Os organizadores da Atena Editora agradecem especialmente os autores dos diversos capítulos apresentados, parabenizam a dedicação e esforço de cada um, os quais viabilizaram a construção dessa obra no viés da temática apresentada.

Por fim, desejamos que esta obra, fruto do esforço de muitos, seja seminal para todos que vierem a utilizá-la.

Helenton Carlos da Silva

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>1</b>  |
| ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETO DESENVOLVIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA CIDADE DE SÃO CARLOS/SP  |           |
| Tatiane Caroline Rocha Lemos<br>Eduvaldo Paulo Sichieri<br>Victor José dos Santos Baldan  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909101</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>13</b> |
| ESTUDO DE DOSAGEM DE ARGAMASSA A PARTIR DE RESÍDUO PROVENIENTE DA RECICLAGEM DE PNEUS   |           |
| Tatiane Caroline Rocha Lemos<br>Eduvaldo Paulo Sichieri<br>Victor José dos Santos Baldan  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909102</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>25</b> |
| ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICA DA MADEIRA: UMIDADE, DENSIDADE APARENTE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELAS ÀS FIBRAS DAS ESPÉCIES COMERCIALIZADAS NO MUNICÍPIO DE BOA VISTA-RR |           |
| Weiza Nunes Barbosa<br>Emerson Lopes de Amorim<br>Luiz Gustavo Ayres Barros<br>Kellen de Souza Singh<br>Lucas Matos de Souza<br>José Castro Lima  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909103</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....   | <b>37</b> |
| ANÁLISE DOS EFEITOS DA VAZÃO MÁSSICA SOBRE A DEPOSIÇÃO DE INCRUSTAÇÕES EM AQUECEDORES DE LEITE DO TIPO PLACAS PLANAS GAXETADAS  |           |
| Alex Vazzoler   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909104</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....   | <b>47</b> |
| AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FARINHA DE MANDIOCA ( <i>Manihot esculenta Crantz</i> ) EM COMUNIDADE TRADICIONAL DO MUNICÍPIO DE MACAPÁ-AP E POSSÍVEIS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS                      |           |
| Roberto Quaresma Santana<br>Lia Carla de Souza Rodrigues<br>Jorge Emílio Henriques Gomes<br>Marília de Almeida Cavalcante   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909105</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 6</b> .....   | <b>55</b> |
| AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE MACROTEXTURA E DRENABILIDADE EM DUAS PISTAS DE POUSO NA REGIÃO DO VALE DO ARAGUAIA   |           |
| Thamires Ferreira da Silva  |           |

Lucas Jorge Freitas Marinho  
Augusto Romanini  
Raul Tadeu Lobato Ferreira

**DOI 10.22533/at.ed.0171909106**

**CAPÍTULO 7 ..... 69**

COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DE GELATINAS OBTIDAS A PARTIR DAS PELES DE MAPARÁ (*Hypophthalmidae*) E URITINGA (*Arius Proops*)

Élida Viana de Souza  
Jiullie Delany Bastos Monteiro  
Nara Helem Brazão da Costa  
Leliane da Silveira Barbosa Gomes  
Iara Eleni de Souza Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.0171909107**

**CAPÍTULO 8 ..... 77**

CONTROLE ESTRUTURAL DO DEPÓSITO PLACER DE MINERAIS PESADOS NA REGIÃO PRAIAL AO NORTE DA DESEMBOCADURA DA LAGOA DOS PATOS (BUJURU, BRASIL)

Bruno Silva da Fontoura  
Adelir José Strieder  
Jéssica Stern Behling  
Rui Sérgio Saraiva Duarte Junior  
Talita Cabelera da Silva  
Paulo Mendes  
Aureliano Augusto Vieira da Nóbrega  
Lauro Julio Calliari

**DOI 10.22533/at.ed.0171909108**

**CAPÍTULO 9 ..... 87**

ESTRUTURA FÍSICA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PAUTADO EM PROTÓTIPO 8/6

Marcos José de Moraes Filho  
Luciano Coutinho Gomes  
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira  
Darizon Alves de Andrade  
Josemar Alves dos Santos Junior  
Wanberton Gabriel de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.0171909109**

**CAPÍTULO 10 ..... 99**

VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA NA MANGUEIRA EM FUNÇÃO DE SEU ENROLAMENTO

Diogo Henrique Morato de Moraes  
Ricardo Marques da Silva Viegas  
Dione Monteiro de Moraes  
Matheus Henrique Morato de Moraes  
Marcio Mesquita

**DOI 10.22533/at.ed.01719091010**

**CAPÍTULO 11 ..... 109**

**ÍNDICE DE DESEMPENHO DE MISTURAS TERNÁRIAS CONTENDO CIMENTO PORTLAND SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E NANOSSÍLICA COLOIDAL**

Daniel da Silva Andrade  
Josué Régio Damaceno  
Laércio Breno Moreira  
Aline Alves de Almeida  
João Henrique da Silva Rêgo

**DOI 10.22533/at.ed.01719091011**

**CAPÍTULO 12 ..... 122**

**LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO E IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE PESQUISAS CIENTÍFICAS NA ÁREA DAS CIÊNCIAS SOCIAIS SOBRE A CANA-DE-AÇÚCAR PARA O SEGMENTO SUCROENERGÉTICO**

Manoel Gonçalves Filho  
Clóvis Delboni  
Reinaldo Gomes da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.01719091012**

**CAPÍTULO 13 ..... 135**

**MELHORIA NO PROCESSO DE MONTAGEM ATRAVÉS DA FERRAMENTA POKA YOKE: UM ESTUDO DE CASO NO MCDONALD'S**

Jéssika Alvares Coppi Arruda Gayer  
Dayse Mendes  
Douglas Soares Agostinho  
Felipe Martins Machado  
Jennifer Evangelista Cavalcante  
Kellen Coelho dos Santos  
Marcos Augusto Mendes Marques  
Marcos Henrique Morais  
Renatha Querubina de Anevam  
Rodrigo Ramiro Prior

**DOI 10.22533/at.ed.01719091013**

**CAPÍTULO 14 ..... 144**

**MODELAGEM DA DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA UTILIZANDO UMA ABORDAGEM ANALÍTICA**

Régis Sperotto de Quadros  
Glênio Aguiar Gonçalves  
Daniela Buske

**DOI 10.22533/at.ed.01719091014**

**CAPÍTULO 15 ..... 153**

**O ÍNDICE DE CONFIABILIDADE PARABÓLICO**

Emmanoel Guasti Ferreira  
Marcílio Sousa da Rocha Freitas  
José Antônio da Rocha Pinto  
Geraldo Rossoni Sisquini

**DOI 10.22533/at.ed.01719091015**



|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 16</b> .....  | <b>168</b> |
| RE-EVALUATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TOTAL ACID NUMBER ON NAPHTHENIC CORROSION BY ELECTROCHEMICAL NOISE TECHNIQUE  |            |
| Ana Carolina Tedeschi Gomes Abrantes<br>Alysson Nunes Diógenes<br>Haroldo de Araújo Ponte   |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091016</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 17</b> .....  | <b>179</b> |
| SLOW-RELEASE FERTILIZER FROM A ROCK CONTAINING GLAUCONITE BY THERMAL PROCESSING WITH ADDITIVES  |            |
| Antonio Clareti Pereira<br>Emily Mayer de Andrade Becheleni<br>Marta Ribeiro dos Santos Gomes<br>Sônia Denise Ferreira Rocha  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091017</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 18</b> .....  | <b>190</b> |
| UMA INTRODUÇÃO AO USO DA INTEGRAL DE DUHAMEL EM SISTEMAS DINÂMICOS ESTRUTURAIIS   |            |
| Natan Sian das Neves  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091018</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 19</b> .....  | <b>202</b> |
| USO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE ADSORÇÃO COM TURFA PARA REMOÇÃO DA TURBIDEZ DE EFLUENTE OLEOSO  |            |
| Regina Celia de Oliveira Brasil Delgado<br>Francisco Igor da Costa Freire<br>Andréa Francisca Fernandes Barbosa<br>André Luís Novais Mota<br>Kalyanne Keyly Pereira Gomes                                       |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091019</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 20</b> .....  | <b>211</b> |
| UTILIZAÇÃO DE COBERTURA COMESTÍVEL NA CONSERVAÇÃO DE HORTIFRUITI  |            |
| Martiliana Mayani Freire<br>Leoclécio Luis de Paiva<br>Laís Barreto Franco<br>Anna Paula Marques Cardoso<br>Gleison Martins Medeiros Raposo<br>Caliane Lília Leite do Nascimento<br>Pedro Fagner Araújo Pereira |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091020</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 21</b> .....  | <b>218</b> |
| MAPEAMENTO E AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE CAIXAS COLETORAS DE DRENAGENS URBANAS NA REGIÃO DO PORTO DE PELOTAS/RS   |            |
| Marciano Carneiro<br>Milton Cruz Fernandes  |            |

Angélica Cirolini  
Alexandre Felipe Bruch  
Lenon Silva de Oliveira  
Gabriel da Silva Pontes

**DOI 10.22533/at.ed.01719091021**

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>SOBRE O ORGANIZADOR.....</b> | <b>232</b> |
| <b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>   | <b>233</b> |

## ANÁLISE DOS EFEITOS DA VAZÃO MÁSSICA SOBRE A DEPOSIÇÃO DE INCRUSTAÇÕES EM AQUECEDORES DE LEITE DO TIPO PLACAS PLANAS GAXETADAS

**Alex Vazzoler**

Universidade de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

E-mail para contato: vazzoleralex@hotmail.com

**RESUMO:** A deposição de incrustações, indiscutivelmente, é um dos maiores desafios enfrentados no projeto, e na operação de equipamentos de transmissão de calor. Esse problema se agrava na indústria de alimentos, devido a necessidade de higienização das operações. Neste trabalho foi verificado o efeito da variação da vazão mássica, estipulada entre 0,7 e 1,12 kg/s, sobre a perda de carga admissível de um trocador de calor do tipo placas sanitárias dentro dos tempos de operação necessários para o recobrimento de 9,1 e 17,7% de sua superfície. Utilizou-se como modelo de deposição de incrustações a correlação de Lalonde e Corrieu. Concluiu-se que, a vazão de leite de 1,08 kg/s atende a todos os critérios hidráulicos e térmicos. Não obstante, inibe a deposição de incrustações durante o período de um ano, ou seja, período usual de parada da planta e limpeza do equipamento.

### 1 | INTRODUÇÃO

A deposição de incrustações em trocadores do tipo placas durante o processamento de

leite eleva os custos com a operação e afeta a qualidade dos produtos envolvidos. Cientes destes empecilhos, os operadores almejam definir as melhores condições de operação de forma a serem obtidas, as condições mais convenientes nos pontos de vista econômico e sanitário (Khalidia *et al.*, 2015).

Algumas consequências ao executar-se um combate ineficiente a deposição de incrustações é o descumprimento das metas de aquecimento, temperaturas, que ao não serem atingidas, podem afetar as especificações do leite e seus derivados. Cabe salientar que é necessário um grau extremo de assepsia neste tipo de operação, e de modo algum é pertinente a formação de depósitos de incrustações, salinas ou proteicas, nas superfícies dos trocadores de calor e demais equipamentos. Não obstante, a limpeza destes equipamentos consome tempo, conseqüentemente custo de mão de obra, e os produtos utilizados para a limpeza e esterilização, muitas vezes, são nocivos ao meio ambiente e possuem alto custo.

As principais formas de combate a deposição de incrustações na indústria de laticínios são: o uso de superfícies anti-incrustantes e a diminuição de depósitos pela elevação da velocidade de escoamento. Já

que o uso de inibidores de incrustações afetaria as especificações dos produtos, impedindo o seu uso. Ambas as abordagens previamente supracitadas apresentam adversidades. No primeiro caso, o custo deste tipo de material é elevado, o que implica em uma elevação considerável dos custos de aquisição e instalação dos equipamentos. No segundo caso, os custos com bombeamento são ampliados em virtude da elevação da vazão de escoamento. Porém, é um método que pode ser aplicado em plantas em operação, desde que os critérios de perda de carga dos equipamentos sejam satisfeitos (Cao, 2010 e Zhang *et al.*, 2013).

Desafortunadamente, a estimativa do fator de incrustações é muitas vezes feita de forma rudimentar. A abordagem pela qual valores são arbitrados a partir da experiência do projetista ou de tabelas da literatura, cujas condições de obtenção dos valores, em muitos casos, não são explícitas, podem gerar problemas como o subdimensionamento hidráulico. Consequentemente, este tipo de abordagem é insatisfatória para problemas como o descrito neste trabalho, já que na indústria de alimentos há uma grande necessidade de esterilização dos equipamentos e a ocorrência de deposição de incrustações salinas, proteicas ou biológicas pode comprometer o produto (Fryer *et al.*, 1989).

## 2 | MECANISMO E MODELO MATEMÁTICO DA DEPOSIÇÃO DE INCRUSTAÇÕES

No presente trabalho a formulação do problema ocorre dentro de um trocador do tipo placas para pasteurização de leite. Foi utilizado um modelo cujas hipóteses foram formuladas por *Lalande e Corrieu* (Fryer *et al.*, 1989). Este é um modelo unidimensional e transiente, satisfatório a necessidade de avaliar-se os efeitos hidráulicos sobre a cinética da deposição de incrustações. Este modelo obedece a uma formulação de adsorção endotérmica e inversamente proporcional ao número de Reynolds ( $Re$ ) conforme a Equação 1 (Zhang *et al.*, 2013):

$$\frac{dBi}{dt} = \frac{k_d}{Re} \exp\left(-\frac{E}{R} \frac{1 + Bi}{T_w + T_b Bi}\right) - k_r Bi \quad (1)$$

O modelo engloba a utilização de um adimensional convectivo transiente, *Biot* ( $Bi$ ), as temperaturas de parede ( $T_w$ ) e do fluido ( $T_b$ ), a energia de ativação de desnaturação da *betalactoglobulina* ( $E$ ) cujo valor é 92,4 kJ/mol, a constante universal dos gases ( $R$ ) com o valor de 8,314 J/mol.K e as taxas específicas de adsorção ( $K_a$ ) e dessorção ( $K_r$ ) da *betalactoglobulina* (*BTG*) são, respectivamente,  $4,85 \cdot 10^{-13} s^{-1}$  e  $1,3 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ . *Biot*, é então definido como a razão entre o produto do coeficiente de película da superfície ( $h_s$ ) e o comprimento equivalente da placa ( $L_e$ ) divididos pela condutividade térmica das incrustações ( $k_i$ ), Equação 2. Cabe salientar, a definição da fração de recobrimento da superfície das placas do trocador

de calor pelas incrustações ( $\delta_I$ ), Equação 3, esta é o percentual de área da placa recoberto com uma camada de incrustações cuja a espessura é maior ou igual a espessura crítica,  $\varphi$  (em  $\mu\text{m}$ ), estimada através da correlação empírica de Gilbert-Rideau para placas com corrugação de  $45^\circ$ , equação 4 (Fryer *et al.*, 1989).

$$Bi = \frac{h_s L_e}{k_I} \quad (2)$$

$$\delta_I = \frac{Bi}{1 + Bi} \quad (3)$$

$$\varphi = 4,326 \delta_I^{1,32} \quad (4)$$

O mecanismo predominante para a deposição de incrustações no leite entre a faixa de temperatura de  $70$  a  $90^\circ\text{C}$  é a desnaturação da *betalactoglobulina* (BTG). Este processo é iniciado quando o leite é aquecido a temperatura superiores a  $65^\circ\text{C}$  e a estrutura da BTG tornando-se instável gerando o precursor para a incrustação segundo dois possíveis mecanismos: A proteína natural *betalactoglobulina* (*N-Proteína*) é submetida a um processo de desnaturação (mudança de estrutura) tornando-se altamente reativa devido a sua ligação enxofre-hidrogênio, S-H (forma desnaturada da *betalactoglobulina* ou *D-Proteína*). O segundo mecanismo é uma reação de polimerização irreversível, que resulta em partículas insolúveis observadas como agregados de proteína (agregados de *betalactoglobulina*). Já a deposição de incrustações salinas, se deve a solubilidade deste sal ser inversamente proporcional a temperatura. Logo, em superfícies aquecidas ocorrerá a sua precipitação, e conseqüente, adesão (Mahdi *et al.*, 2009).

Baseado na hipóteses supracitadas foram feitas as seguintes considerações para a resolução analítica da Equação 4 (Mahdi *et al.*, 2009) e Khaldia *et al.*, 2015):

1. Na condição inicial, assume-se que a superfície esteja isenta da deposição de incrustações, ou seja, o Número de Biot é nulo ( $Bi(0) = 0$ );
2. A superfície das placas é considerada plana e perfeitamente lisa, e sua geometria é regular em toda a sua extensão;
3. As propriedades térmicas dos materiais das placas do trocador são consideradas constantes na faixa de temperatura utilizadas;
4. As taxas específicas de adsorção ( $k_d$ ) e dessorção ( $k_r$ ) da *betalactoglobulina* (BTG) são consideradas constantes na faixa de temperatura utilizadas;

A partir da resolução analítica da Equação 1, é obtida a Equação 5:

$$\frac{k_d}{Re} t = e^{-E/RT_b} \left[ Bi(t) \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_b} \frac{T_w - T_b}{T_b Bi(t) + T_w}\right) - \frac{E}{RT_b^2} (T_w - T_b) Ei\left(-\frac{E}{RT_b} \frac{T_w - T_b}{T_b Bi(t) + T_w}\right) \right] + \frac{T_w}{T_b} \exp\left(-\frac{E}{RT_b} \frac{1 + Bi(t)}{T_b Bi(t) + T_w}\right) + e^{-K_r t} \quad (5)$$

em que  $T_w$  e  $T_b$  são as temperaturas da parede da placa e a temperatura do fluido (*bulk*) respectivamente. Ambas as grandezas podem ser relacionadas pela Equação 6, proposta por *Suitor* 1978, válida para escoamentos turbulentos entre placas com espaçamento igual a  $2e$ .  $Pr$  é o adimensional de Prandtl, Equação 7, suas propriedades são calculadas na temperatura de filme (média aritmética de  $T_w$  e  $T_b$ );  $Nu_b$  é o adimensional de *Nusselt*, Equação 8, para as condições bulk do escoamento, cujo o valor para fluidos com baixa viscosidade é de 2000. As demais variáveis são a condutividade térmica ( $k$ ); a vazão mássica ( $W$ ); a viscosidade ( $\mu$ ) e a condutividade térmica ( $k$ ) do líquido em escoamento. As correlações para a estimativa das propriedades termofluidodinâmicas da água e do leite foram retiradas dos trabalhos de Wagner e Kretzsmar (2008), Khan et al. (2010) e Mahdi *et al.* (2009), respectivamente.

$$T_w - T_b = \frac{W_l D_e^2}{15,4k_l} Nu_b^{0,23} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (7)$$

$$Nu_b = 0,0566 Re^{0,881} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad \text{para } 500 < Re < 4500 \text{ e } 5,6 < Pr < 8,0 \quad (8)$$

### 3 | EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DOS CÁLCULOS TÉRMICOS E HIDRAÚLICOS NO TROCADOR DE CALOR TIPO PLACAS

Este trabalho envolve cálculos térmicos que devem ser precedidos pelas estimativas das propriedades fluidodinâmicas. Um trocador de calor do tipo placas sanitárias, com três passes por fluido, deve aquecer leite da temperatura de 30 a 70 °C utilizando-se como fluido quente água de recirculação com temperatura de entrada de 90 °C. Os cálculos devem ser executados para ambos os fluidos para verificar-se se todos os critérios requeridos.

#### 3.1 Cálculo das perdas de carga a partir dos dados do trocador de calor

Os principais fatores que afetam o escoamento em trocadores do tipo placas são: a profundidade ( $e$ ), a largura ( $b$ ) e o número de canais em série ( $n_s$ ), seus valores são: 0,005 m, 0,36m e 10 (Figura 1). Além da vazão mássica ( $W_l$ ) e densidade ( $\rho_l$ ) do fluido em escoamento. Suas relações com a velocidade de escoamento do fluido ( $u_l$ )

são explicitados pela Equação 9 (Cao, 2010).

$$u_l = \frac{W_l}{\rho_l n_s b e} \quad (9)$$

Outro elemento a ser considerado é o efeito das corrugações; irregularidades na superfície das placas do trocador com o objetivo de aumentar a área de contato entre os fluidos e as mesmas. Este fator ( $\phi_a$ ) irá afetar o diâmetro equivalente do canal ( $D_e$ ), conforme a Equação 10 (Cao, 2010).

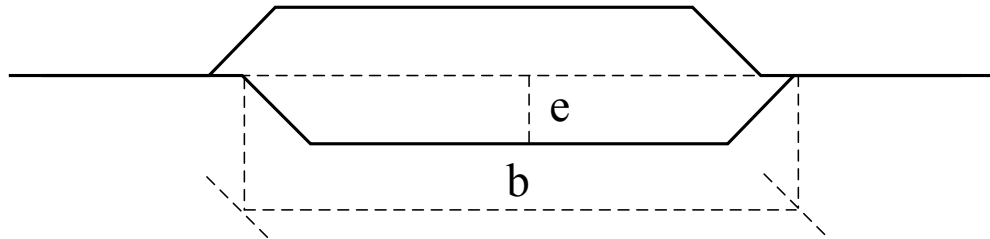


Figura 1. Representação de um canal em trocador de calor do tipo placas com um ângulo de corrugação de 45°.

$$D_e = \frac{2 b e}{(e + b \phi_a)} \cong \frac{2 e}{\phi_a} \quad (10)$$

Algumas consequências estão diretamente relacionadas a utilização de maiores ângulos de corrugação. A primeira, evidenciada pela Equação 11, aponta que placas com maiores ângulos de corrugação operam sobre escoamentos com menor turbulência. Consequentemente, os valores do Fator de Darcy ( $F_l$ ) e da perda de carga nas placas do trocador ( $\Delta P_p$ ), Equação 9, serão reduzidos (Focke *et al.*, 1989 e Cao, 2010).

$$Re_l = \frac{u_l D_e}{\eta_l} \quad (11)$$

$$\Delta P_p = \frac{2 f_l L_e n_s \rho_l u_l^2}{D_e} \quad (12)$$

Desafortunadamente, sob a perspectiva da transmissão de calor, operar-se o trocador com condições mais amenas de turbulência gera menores coeficientes de transmissão de calor. Portanto, ao ampliar-se a área de troca térmica, com a corrugação, são diminuídos os valores do coeficiente de transmissão de calor, o que gera um antagonismo entre estas duas variáveis. Neste trabalho, foi utilizado o menor ângulo de corrugação em placas sanitárias comerciais, 60° (com um valor de  $\phi_a$  de 1,14), para ampliar-se o intervalo de vazões mássicas admissíveis em relação ao

limite de perda de carga (Focke *et al.*, 1989).

De maneira análoga as placas, ocorre perda de carga nos *headers* do trocador de calor. Esta variável é dependente, em grande parte, do diâmetro dos *headers* ( $D_h$ ) e da vazão mássica dos fluidos ( $W_l$ ). Logo, as equações da taxa de vazão mássica ( $G_h$ ), Equação 14, de perda de carga nos *headers* ( $\Delta P_h$ ), Equação 15, e perda de carga total ( $\Delta P_t$ ), Equação 12, são explicitadas abaixo (Cao, 2010):

$$G_h = \frac{4W_l}{\pi D_h^2} \quad (13)$$

$$\Delta P_h = \frac{1.5 n_s G_h^2}{2\rho_l} \quad (14)$$

$$\Delta P_t = \Delta P_p + \Delta P_h \quad (15)$$

Cabe salientar a relevância da estimativa do custo de bombeamento ( $C_b$ ) a análise, tendo-se em perspectiva a sua influência nos custos operacionais da planta. O uso da Equação 16 pode ilustrar em quão vantajoso, ou não, é a elevação da vazão de escoamento, ou de perda de carga, dos fluidos.

$$C_b = \frac{cQ\Delta P_t \eta_r}{21917 d_r \xi_b \xi_m} \quad (16)$$

São evidenciados, na equação anterior os dois principais fatores no bombeamento, as propriedades hidrodinâmicas do fluido: a densidade relativa ( $d_r$ ) e a viscosidade relativa ( $\eta_r$ ), ambas definidas como a razão entre a grandeza na condição de escoamento e a água a 15,56 °C (60 °F). E as características mecânicas da bomba, representadas pelo custo do quilowatt-hora (kWh) da eletricidade industrial ( $c$ ), 415,2 R\$/MWh e pelas eficiências de bombeamento ( $\xi_b$ ) e do motor ( $\xi_m$ ) de 0,85 e 0,9.

## 3.2 Metodologia proposta

### 3.2.1 Análise de sensibilidade

A primeira etapa nos cálculos é estabelecer uma análise de sensibilidade, variando-se a vazão de escoamento do leite de 0,4 a 1,5 kg/s, calculando-se a temperatura de parede,  $T_w$  (em °C) e a espessura crítica da incrustação,  $\varphi$  ( $\mu\text{m}$ ) Fixando-se o tempo de operação em 1 ano para todos os casos, para avaliar-se os intervalos de valores e a relação gráfica entre as variáveis. Estes dados definirão as margens de estudo para a etapa seguinte.



### 3.2.2 Cálculos para balanço hidráulico e econômico

A partir das propriedades fluidodinâmicas do leite e da água, das especificações do trocador de calor, e das vazões de mássica de leite e água, relacionadas pelo balanço de energia. Foram selecionadas três variáveis para o cálculo: a vazão mássica de escoamento do leite ( $W_l$ ), o tempo de operação ( $t$ ) e a fração de recobrimento da superfície ( $\delta_l$ ). Cabe salientar que a última variável é dependente do número de *Biot*, conforme a Equação 3, e o aumento da deposição de incrustações é proporcional a ambas as variáveis. Logo, quanto maior o valor desses adimensionais, maior a perda de eficiência do trocador.

Na Figura 2 são ilustradas por meio de diagramas as duas abordagens propostas para este trabalho. A primeira abordagem possui um valor de vazão mássica estabelecido por uma condição de operação. Por conseguinte, as variáveis de resposta são a perda de carga e o tempo de operação necessários para atingir-se uma fração de recobrimento da superfície definida como tolerável pelo projetista.

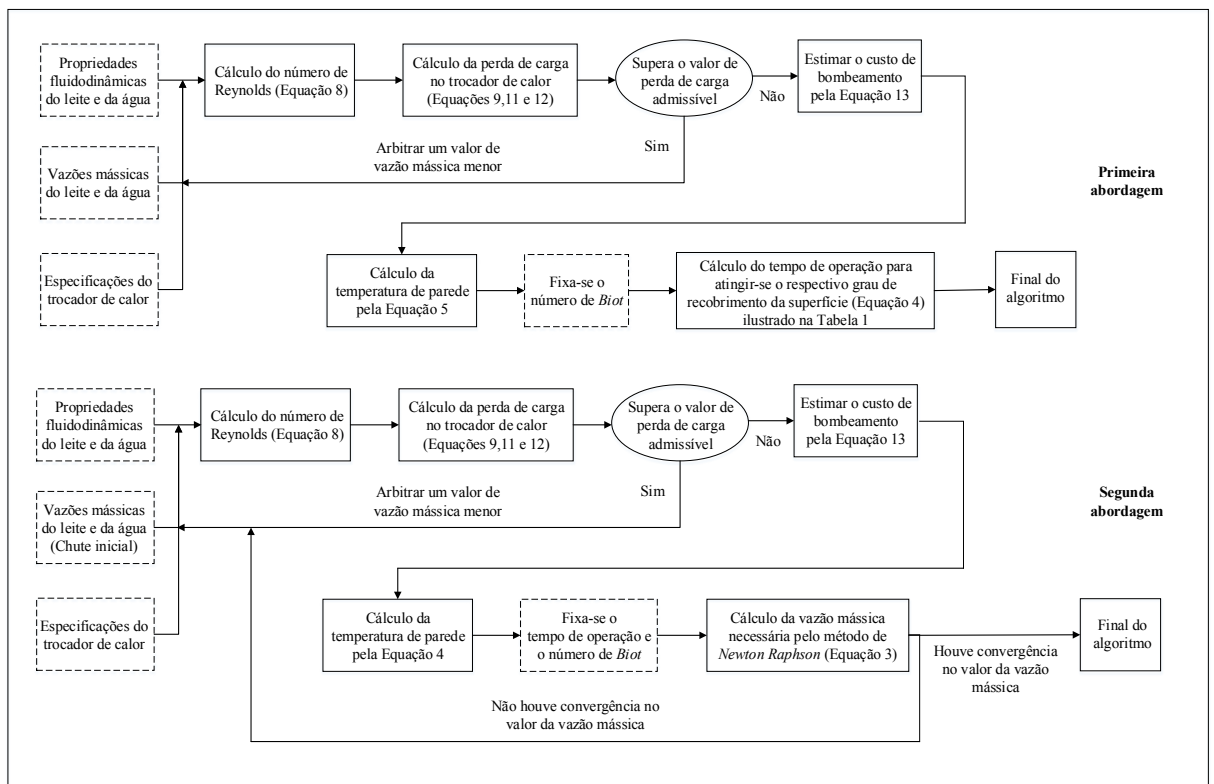


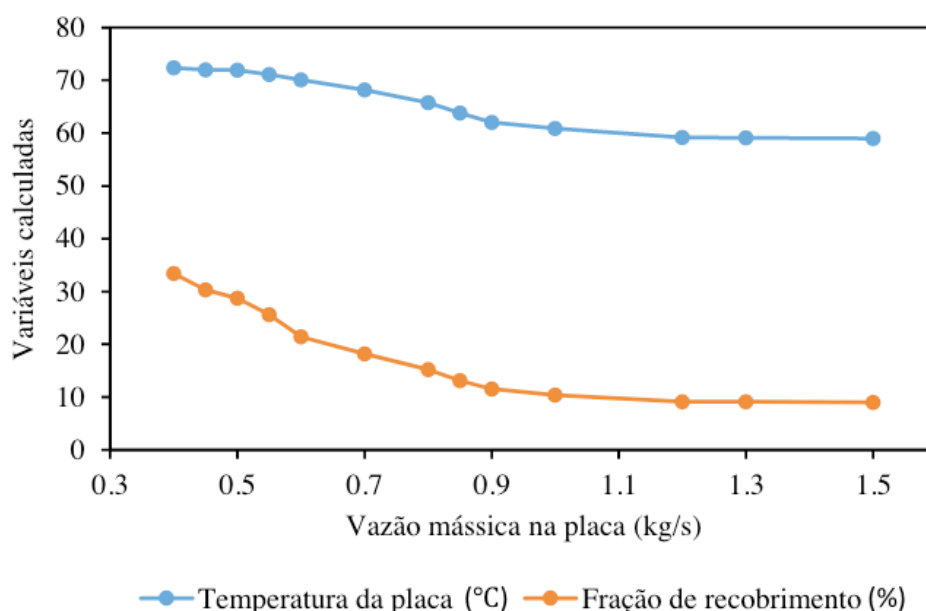
Figura 2. Abordagens utilizadas para análise do efeito da vazão mássica e tempo de operação sobre a perda de carga e a fração de recobrimento da superfície das placas do trocador de calor.

Na segunda abordagem, por outro lado, almeja-se calcular a vazão mássica necessária para que seja atingido uma determinada fração de recobrimento da superfície em um determinado tempo de operação. A principal aplicação desta abordagem é calcular a vazão mássica de leite necessária para atingir-se um *período de indução* (período em que não ocorre deposição de incrustações) de um ano,

período usual de manutenção e limpeza dos trocadores. Porém, pode ser utilizado para serem estimadas vazões para limites de frações de recobrimento aceitáveis, já que muitas vezes, será necessária uma vazão hidraulicamente inviável para atingir-se um período de indução desejado.

#### 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os dados de fração de recobrimento da placa, e temperatura de parede da placa,  $T_w$ , dentro de um intervalo de vazões de 0,4 a 1,5 kg/s do fluido escoando sobre a placa do trocador de calor. Nota-se que a medida que a vazão é aumentada, ocorre diminuição de ambas as variáveis (resultado esperado, já que a espessura foi definida como função da fração de recobrimento) até ser atingido um patamar de 9,1% por volta de 1,15 kg/s.



**Figura 3.** Análise de sensibilidade das variáveis fração de recobrimento,  $\delta_f$  e temperatura de parede da placa,  $T_w$ , em função da vazão mássica em escoamento sobre a placa.

A partir da Figura 3 define-se como intervalos de cálculos as vazões entre 0,7 e 1,15.

A partir das abordagens propostas na Figura 2, nesta ordem, foram erigidas as Tabelas 1 e 2. Na Tabela 1 foram fixados diferentes valores de vazão mássica, para dois números de *Biot*, 0,1 e 0,2. Representando, conforme a Equação 3, frações de recobrimento da superfície de 9,1 e 17,7%

| $W_1$ (kg/s) | $100 \cdot \delta_1$ (%) | $C_b$ (R\$/ano) | $\Delta P_t$ (kPa) |       | t (ano) |
|--------------|--------------------------|-----------------|--------------------|-------|---------|
|              |                          |                 | Leite              | Água  |         |
| 0,7          | 9,1                      | 2750            | 66,1               | 96,3  | 0,759   |
| 0,7          | 17,7                     | 2880            | 66,1               | 96,3  | 0,863   |
| 0,85         | 9,1                      | 3270            | 81,3               | 119,0 | 1,09    |
| 0,85         | 17,7                     | 3430            | 81,3               | 119,0 | 1,22    |
| 0,95         | 9,1                      | 3620            | 91,5               | 134,0 | 1,30    |
| 0,95         | 17,7                     | 3790            | 91,5               | 134,0 | 1,44    |
| 1,05         | 9,1                      | 3960            | 102,0              | 150,0 | 1,50    |
| 1,05         | 17,7                     | 4150            | 102,0              | 150,0 | 1,65    |
| 1,13         | 9,1                      | 4380            | 110,2              | 160,0 | 1,92    |
| 1,13         | 17,7                     | 4380            | 110,2              | 160,0 | 2,19    |

Tabela 1. Relações entre vazão mássica do leite, custos de bombeamento e tempo de operação para as frações de recobrimento de superfície de 9,1 e 17,7%.

| $100 \cdot \delta_1$ (%) | $\Delta P_t$ (kPa) |       | $W_1$ (kg/s) |
|--------------------------|--------------------|-------|--------------|
|                          | Leite              | Água  | Leite        |
| 17,7                     | 69,3               | 102,2 | 0,756        |
| 9,1                      | 75                 | 108   | 0,806        |
| 0                        | 105                | 155   | 1,08         |

Tabela 2. Vazões mássicas para percentuais fixos de recobrimento no período de um ano.

Na Tabela 1 foram utilizados diferentes valores de vazão mássica com o objetivo de calcular-se o tempo de operação (t) para dois percentuais de recobrimento das placas e limites de perda de carga de 120 e 160 kPa, para o leite e a água respectivamente. Como esperado, ao elevar-se a vazão mássica, serão elevados os valores do custo de bombeamento, perda de carga e o tempo necessário para a superfície atingir o percentual de recobrimento especificado. Já que a elevação da vazão mássica desfavorece o processo de adesão das proteínas e dos sais. Na Tabela 2, por outro lado, foram calculados os valores de vazão mássica necessários para atingir-se as respectivas frações de recobrimento no período de um ano. Logo, ao operar-se com uma vazão mássica de 1,08 kg/s, valor próximo ao limite de perda de carga, é possível operar-se durante o período de um ano sem a deposição de incrustações. Todavia, há uma elevação no custo de bombeamento para 4260 R\$/ano.

## 5 | CONCLUSÕES

Foi mostrado que é possível projetar a operação de um trocador de calor, durante o período de um ano, sem a deposição de incrustações, utilizando-se um

modelo adequado para descrever o mecanismo de formação de depósitos em função das características de escoamento. No presente trabalho foi utilizado o modelo de *Lalande e Corrieu*. No exemplo apresentado a vazão mássica necessária para evitar a formação de depósito (1,08 kg/s) é próximo do limite de perda de carga do trocador de calor. Entretanto, a elevação nos custos de bombeamento pode ser contrabalanceada pelos menores custos de manutenção e limpeza.

## REFERÊNCIAS

KHAN, T.S.; KHAN, M. S.; CHYU, M. C.; AYUB, C. H. Experimental investigation of singlephase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations, *Applied Thermal Engineering.*, v. 30, p. 1058–1065, 2010.

CAO, E. *Heat transfer in process engineering*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010.

FRYER, P. J. The uses of fouling models in the design of food process plant. *Journal of the society of Dairy Technology.*, v. 42, p. 23-29, 1989.

FOCKE, W.W.; ZACHARIADES, J.; OLIVIER, I. The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, v. 28, p. 1469-1479, 1989.

KHALDIA, M.; BLANPAIN-AVET, P.; GUÉRIN, R.; RONSE, G.; BOUVIER, L.; ANDRÉ, C.; BORNAZ, S.; CROGUENNEC, T.; JEANTET, R.; DELAPLACE, G. Effect of calcium content and flow regime on whey protein fouling and cleaning in a plate heat exchanger. *Journal of Food Engineering.*, v. 147, p. 68–78, 2015.

MAHDI, Y.; MOUHEB, A.; OUFER, L. A dynamic model for milk fouling in a plate heat exchanger. *Applied Mathematical Modelling.*, v. 33, p. 648-662, 2009.

SUITOR, J. W. Plate Heat Exchanger Fouling Study., *HTRI Report No. F-EX-18*, 1978.

WAGNER, W.; KRETZSMAR, H. *International Steam Tables Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97*. Berlin: Springer, 2008.

ZHANG, G., LI, G., LI, W.; ZHANG, Z.; LENG, X., TIAN, M. Particulate fouling and composite fouling assessment in corrugated plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V. 60, p. 263–273, 2013.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Adsorção 38, 39, 202, 203, 204, 205, 206, 208, 209, 210

Agregado artificial 1, 11, 13

### B

Biomassa 47, 49, 52, 54

Bloco estrutural 13, 20

### C

Cimento Portland 3, 113, 120

Concreto reciclado 1, 13, 15

Controle estrutural 77, 80, 84, 85

Corrosão 202, 203

### D

Desperdícios 127, 135, 140, 142

Dinâmica estrutural 190, 191, 200

Drenabilidade 55, 56, 57, 58, 60, 61, 64, 65, 66, 67, 68

Drenagem urbana 218, 219, 231

### E

Energia 14, 27, 38, 43, 47, 52, 53, 54, 96, 97, 98, 103, 115, 126, 127, 133, 232

Ensino 139, 190, 232

### F

Farinha de mandioca 47, 49, 50, 52, 54

### I

Índice de confiabilidade 153, 154, 155, 156, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 165, 166

Inovação 76, 122, 124, 125, 126, 127, 232

Irrigação 99, 100, 108

### M

Madeira 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 51, 52

### N

Nanossílica 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121

### P

Pozolana 109, 110

Propriedade mecânica 25, 27

Propriedades físicas 25, 26, 27, 28, 71, 111

## **R**

Resíduos 1, 2, 4, 10, 12, 13, 14, 15, 19, 22, 23, 47, 49, 52, 53, 54, 69, 70, 71, 72, 74, 76, 110, 208, 229

Resíduos de pneu 13, 15

## **S**

Sílica de casca de arroz 109, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120

Solução analítica 144, 151

Sustentabilidade 1, 14, 24, 35, 74, 127, 138, 142, 232

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-701-7



9 788572 477017