



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DE TRATAMENTOS ALCALINOS NA
REMOÇÃO DOS EXTRATIVOS DA BIOMASSA DE MADEIRA E SEUS EFEITOS
NA HIDRATAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO E DE BIOCONCRETO

Mônica Cristina Pinto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

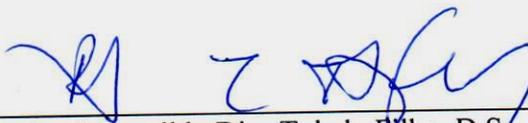
Julho de 2019

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DE TRATAMENTOS ALCALINOS NA
REMOÇÃO DOS EXTRATIVOS DA BIOMASSA DE MADEIRA E SEUS EFEITOS
NA HIDRATAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO E DE BIOCONCRETO

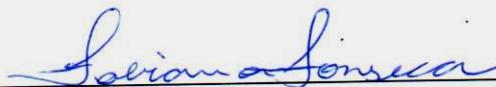
Mônica Cristina Pinto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

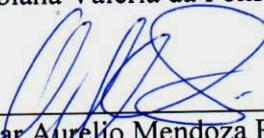
Examinada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



Prof. Fabiana Valéria da Fonseca, D.Sc.



Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2019

Pinto, Mônica Cristina

Influência da temperatura e de tratamentos alcalinos na remoção dos extrativos da biomassa de madeira e seus efeitos na hidratação de pastas de cimento e de bioconcreto/ Mônica Cristina Pinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVII, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 89-97.

1. Bioconcreto de serragem de madeira. 2. Hidratação. 3. Tratamentos físicos. I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*À minha mãe,
por todo amor, confiança e apoio.*

Agradecimentos

A Deus, por ser a luz e guia na minha vida.

À minha mãe, por todo apoio e ajuda. Por sempre ter me mostrado que estudar é o caminho. Por ter me mantido nesta cidade no primeiro ano sem bolsa. Sem ela esse título de Mestre não existiria. Ao meu irmão Neurimar e à minha irmã Renilda, por todo apoio e por todos os conselhos. Aos meus sobrinhos Pedro, Lucas e André, por todas as conversas e brincadeiras. Aos meus avós, Maria Romana e José Pedro e a todas as pessoas da minha família que torceram pela realização deste sonho.

Ao meu orientador, Romildo, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e pela confiança depositada em mim.

Ao Gabinete 7 (Yassin, Vanessa, Iolanda e Dani). Sem vocês este trabalho não teria a mesma qualidade, com certeza. Agradeço por cada conselho, cada ideia, cada dado analisado. Yassin, obrigada por todas as ideias da dissertação, pela ideia e pelas correções do artigo, por ter lido meu texto. Vanessa, obrigada pela ajuda nos ensaios (AIMS, composição química). Iolanda e Dani, obrigada por todas as sugestões.

Ao Giu, dupla de Análise Estrutural e calorimetria adiabática, por não ter desistido de mim, apesar de eu ter recusado 90 % dos seus convites para sair. À Amanda Dantas, por ter lido parte do meu trabalho e pela disposição em me ajudar no que eu precisasse. Ao Bruno, pela companhia nas noites de desespero passadas no Numats. Ao Pedro, por todas as conversas e companheirismo. À Nath Andrade, por todas as risadas e pelo exemplo de vida. Sou sua fã! À Yasmim, pelos conselhos e ajuda com o MEV. À Amanda Vieira, pelas sugestões na parte final deste trabalho. Aos queridos amigos Liuski, Victória, Nath Julião, Rayane, Carla, Lucas, Fabrício, Tamara, Alfredo, Nina, Filipe, Mostafa e todos que contribuíram de alguma forma para meu crescimento e alegraram meus dias.

A toda equipe NUMATS, especialmente Bruna, Adailton, Kleber, Mauro, Marcelo, Luzi e Claudinha por toda a ajuda. Vocês foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao LabTare, em especial à Professora Fabiana, à Amanda e ao Leandro, por terem me acolhido no laboratório e pela paciência para me explicar tudo. Vocês foram peça fundamental nesse trabalho.

Ao CoppeComb, em especial Rejane, Professora Beatriz, Renato e Eduardo, pela disposição em montar todo o aparato para a realização da composição química.

Aos amigos de república, Ana Elza, Ana Paula, André, Cristiano, Pedro e porque não Alex, Amanda Campos, Walter e Werley, por me aturarem, algumas vezes em um colchão na sala e por não me deixarem desamparada.

Aos amigos da Pavimentação, Alex, Ana Elza, André, Carol, Cristiano, Flávia, Larissa, Lucas e Pedro por terem me acolhido como agregada do laboratório. Aos amigos de início de mestrado Isa, Jeni, Lipe e Teotônio, por todas as conversas.

Aos amigos de UFV que levo para a vida, Guilherme e Mário, por todas as vezes que me ouviram e me deram uma palavra de acalento. Amanda Polati, Laiany, Marcos, Maurício e William por todo carinho.

À madeireira Madeirama pela doação da serragem de madeira utilizada nesta pesquisa e aos seus funcionários que gentilmente me ajudaram a recolher toda a serragem transportada ao laboratório.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DE TRATAMENTOS ALCALINOS NA
REMOÇÃO DOS EXTRATIVOS DA BIOMASSA DE MADEIRA E SEUS EFEITOS
NA HIDRATAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO E DE BIOCONCRETO

Mônica Cristina Pinto

Julho/2019

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho foram aplicados diferentes pré-tratamentos na serragem de madeira visando reduzir os extrativos. Para tanto, variou-se a temperatura da água entre 25 e 95°C, o tempo de imersão entre 0,5 e 48 h e a razão massa de serragem:volume de água entre 1:4 e 1:10, realizando um ciclo de lavagem. A lavagem em soluções alcalinas também foi testada. Visando o reaproveitamento da água de lavagem na produção dos bioconcretos utilizou-se as técnicas de nanofiltração e osmose inversa. Ensaio de início e fim de pega com agulha de Vicat foram realizados em pastas para a avaliação do tempo de imersão, temperatura de lavagem e razão biomassa:água. Calorimetria isotérmica foi utilizada para avaliar pastas de cimento produzidas com águas dos processos de filtragem. Calorimetria adiabática e de velocidade do pulso ultrassônico foram realizados em bioconcretos. Os resultados obtidos mostraram que a água aquecida a 80°C retira uma maior quantidade de extrativos e que o tempo de imersão de 30 min é suficiente para solubilizar os extrativos. O uso de osmose inversa se mostrou eficiente no tratamento das águas residuais e pastas produzidas com essas águas apresentaram curvas isocalorimétricas similares à da pasta com água deionizada. A nanofiltração permitiu a passagem dos íons cloreto e aceleraram a hidratação da pasta de cimento. O cálculo de ACV mostrou que o melhor tratamento foi lavar a serragem em água com 4% de CaCl₂. No geral, o bioconcreto com biomassa lavada em água com 4% de CaCl₂ apresentou os melhores resultados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND ALKALINE TREATMENTS ON THE
REMOVAL OF WOOD BIOMASS EXTRACTIVES AND THE EFFECTS ON
HYDRATION OF CEMENT PASTES AND BIOCONCRETES

Mônica Cristina Pinto

July/2019

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

In this work, wood sawdust has undergone different pre-treatments to reduce the amount of extractives. Therefore, the water temperature was varied between 25 and 95°C, the immersion time between 0.5 and 48h, and the sawdust mass:water volume ratio between 1:4 and 1:10, carrying out one washing cycle. Washing in alkaline solutions was also tested. Aiming the reuse of the washing water for the bioconcrete production, nanofiltration and reverse osmosis was tested. Initial and final setting time of pastes were determined by Vicat apparatus in order to evaluate the washing temperature, the immersion time, and the sawdust mass:water volume ratio. Isothermal calorimetry was used to evaluate cement pastes produced with water from the filtration processes. Adiabatic calorimetry and ultrasonic pulse velocity were performed in bioconcreted. The results showed that water heated at 80°C removes a greater amount of extractives. The amount of solubilized extractives with the immersion time of 30 min is sufficient. The use of reverse osmosis was efficient on the treatment of waste water and pastes produced with these waters presented isocalorimetric curves similar of the curve of paste with deionized water. The nanofiltration allowed the passage of the chloride ions and accelerated the hydration of the cement paste. LCA results showed that the best treatment was to wash the wood biomass in solution of 4% CaCl₂. Overall, bioconcreted produced with wood biomass washed in solution of 4 % CaCl₂ showed the best results.

Sumário

Agradecimentos	v
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivos gerais	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Organização da pesquisa.....	3
2 Revisão bibliográfica.....	4
2.1 A madeira.....	4
2.1.1 Estrutura do tronco da árvore	4
2.1.2 Classificação das árvores.....	5
2.1.3 Composição química da madeira.....	6
2.2 Bioconcreto de biomassa vegetal e matriz cimentícia	9
2.3 Compatibilidade química entre cimento e madeira	10
2.3.1 Problema de incompatibilidade química	10
2.3.2 Tratamentos para melhorar a compatibilidade biomassa-cimento	11
2.3.3 Métodos para análise da interação química entre cimento e bio-agregados	12
2.4 Tratamento da água residual por processo de separação por membranas	13
2.4.1 Considerações iniciais	13
2.4.2 Tecnologia de membranas	15

2.4.3	Osmose inversa.....	17
2.4.4	Nanofiltração	17
2.5	Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	18
2.5.1	Aspectos gerais	18
2.5.2	Definição de objetivo e escopo.....	18
2.5.3	Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)	19
2.5.4	Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)	19
2.5.5	Interpretação do ciclo de vida.....	20
2.5.6	Estudos de ACV em bioconcretos	20
3	Materiais e procedimentos experimentais	21
3.1	Caracterização dos materiais	21
3.1.1	Serragem de madeira	21
3.1.1.1	Massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade	22
3.1.1.2	Morfologia da serragem de madeira utilizando <i>Aggregate Imaging System</i> (AIMS)	25
3.1.1.3	Composição química	28
3.1.2	Cimento Portland, metacaulinita e cinza volante	33
3.1.3	Água	35
3.1.4	Aditivos químicos.....	35
3.2	Pré-tratamento da serragem de madeira.....	35
3.3	Tempo de pega.....	37
3.3.1	Matriz cimentícia.....	37
3.3.2	Agulha de Vicat	37

3.4	Sistema de membranas.....	38
3.4.1	Osmose inversa.....	39
3.4.2	Nanofiltração	40
3.4.3	Caracterização das águas residuais e dos permeados	40
3.4.3.1	Potencial hidrogeniônico (pH)	41
3.4.3.2	Condutividade iônica.....	41
3.4.3.3	Absorvância de luz UV em 254 nm	42
3.4.3.4	Cromatografia iônica.....	42
3.4.4	Hidratação da matriz cimentícia por calorimetria isotérmica.....	43
3.5	Produção do bioconcreto	45
3.5.1	Compensação de água	45
3.6	Hidratação do bioconcreto	46
3.6.1	Cinética de hidratação pela velocidade do pulso ultrassônico	46
3.6.2	Elevação adiabática de temperatura	47
3.6.3	Microscopia eletrônica de varredura	49
3.7	Análise do ciclo de vida.....	49
3.7.1	Definição do objetivo e escopo do estudo	49
3.7.2	Análise do inventário.....	50
4	Resultados e discussões	51
4.1	Águas residuais dos diferentes tratamentos da serragem.....	51
4.2	Tempo de pega.....	55
4.3	Sistema de membranas.....	57
4.3.1	Osmose Inversa	57

4.3.1.1	Potencial hidrogeniônico (pH)	58
4.3.1.2	Condutividade iônica.....	59
4.3.1.3	Absorvância 254 nm.....	60
4.3.2	Nanofiltração	61
4.3.2.1	Potencial hidrogeniônico (pH)	61
4.3.2.2	Condutividade iônica.....	62
4.3.2.3	Absorvância 254 nm.....	63
4.3.2.4	Cromatografia de íons	64
4.4	Hidratação da matriz por calorimetria isotérmica.....	66
4.5	Hidratação do bioconcreto	73
4.5.1	Cinética de hidratação pela velocidade do pulso ultrassônico	73
4.5.2	Elevação adiabática de temperatura	75
4.5.3	Microscopia eletrônica de varredura	79
4.6	Análise do ciclo de vida.....	84
4.6.1	Avaliação do impacto ambiental	84
4.6.2	Interpretação dos resultados	85
5	Considerações finais	87
5.1	Conclusões	87
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	87
	Referências Bibliográficas.....	89

Lista de figuras

Figura 2.1: Seção transversal de um tronco de árvore.....	4
Figura 2.2: Planos de corte de um tronco de árvore	5
Figura 2.3: Forma geral das árvores a) Folhosas b) Coníferas c) Exemplo de folhosa - Faia d) Exemplo de conífera - Pinheiro.....	6
Figura 2.4: Estrutura química da celobiose	7
Figura 2.5: Algumas unidades básicas da hemicelulose (MORESCHI, 2014)	8
Figura 2.6: Principais cadeias constituintes da lignina (MORESCHI, 2014)	9
Figura 2.7: Classificação das membranas.....	15
Figura 2.8: Diagramas esquemáticos dos principais tipos de membranas	16
Figura 2.9: Processos de osmose e osmose inversa.....	17
Figura 3.1: a) Fração retida na peneira de malha de 1,18 mm b) Finos da serragem.....	21
Figura 3.2: Homogeneização do material pelo método de pilha alongada.....	22
Figura 3.3: a) Serragem submersa em água b) Secagem após 24 horas	22
Figura 3.4: a) Preenchimento do molde tronco-cônico b) Aplicação dos golpes com haste c) Bio-agregado saturado superfície seca d) Bio-agregado seco.....	23
Figura 3.5: Material no Erlenmeyer de 500 ml	23
Figura 3.6: a) Equipamento para análise das partículas b) Distribuição das partículas no seu interior	25
Figura 3.7: a) Partículas analisadas b) Imagens fornecidas pelo equipamento	27
Figura 3.8: Índice de angularidade da serragem de madeira	28
Figura 3.9: Extrator de Soxhlet	29

Figura 3.10: a) Banho-maria com rotavapor b) Frascos com ciclohexano c) Frascos com acetato de etila d) Frascos com metanol.....	30
Figura 3.11: a) Amostras em banho-maria b) Amostras em refluxo	31
Figura 3.12: Serragem livre de extrativos adicionada de solventes para determinação da holocelulose.....	32
Figura 3.13: Curvas granulométricas dos materiais cimentícios.....	35
Figura 3.14: Conjunto para imersão das partículas de madeira.....	36
Figura 3.15: Aparelho de Vicat utilizado para monitorar a pega	38
Figura 3.16: Sistema utilizado para os Processos de Separação por Membrana.....	39
Figura 3.17: Membrana SW30-2540 para osmose inversa.....	40
Figura 3.18: Membrana NP010 P para nanofiltração	40
Figura 3.19: pHmetro	41
Figura 3.20: Condutivímetro	42
Figura 3.21: Espectrofotômetro modelo UV-1800.....	42
Figura 3.22: Cromatógrafo iônico	43
Figura 3.23: Fluxo total de calor durante a hidratação de uma pasta de cimento (ROCHA, 2015)	45
Figura 3.24: Equipamento e computador para aquisição de dados para o ensaio de pulso ultrassônico.....	46
Figura 3.25: Calorímetros adiabáticos.....	48
Figura 3.26: Limites do sistema de produção (CALDAS <i>et al.</i> , 2017).....	50
Figura 4.1: Águas residuais obtidas após a imersão da serragem de madeira em diferentes temperaturas e tempos de residência	52
Figura 4.2: Águas residuais obtidas após imersão da serragem de madeira utilizando diferentes valores para m_s/m_a	54

Figura 4.3: Águas residuais obtidas com a inclusão de produtos químicos na lavagem da serragem de madeira.....	54
Figura 4.4: Resultados dos tempos inicial e final de pega para $m_s/m_a=1/10$	56
Figura 4.5: Resultados do tempos inicial e final de pega para diferentes valores de m_s/m_a	56
Figura 4.6: Águas residuais antes e depois da osmose inversa	58
Figura 4.7: Valores de pH.....	59
Figura 4.8: Condutividade iônica	60
Figura 4.9: Absorvância em comprimento de onda de 254 nm.....	60
Figura 4.10: Águas residuais antes e depois da nanofiltração	61
Figura 4.11: Valores de pH.....	62
Figura 4.12: Condutividade iônica	63
Figura 4.13: Absorvância em comprimento de onda de 254 nm.....	63
Figura 4.14: Cromatografia de cátions a) Permeados S-1/4-Ca(OH) ₂ e B-1/2,5-Ca(OH) ₂ b) Permeados S-1/4-CaCl ₂ B-1/2,5-CaCl ₂	65
Figura 4.15: Cromatografia de ânions dos permeados S-1/4-CaCl ₂ e B-1/2,5-CaCl ₂	66
Figura 4.16: Curvas de liberação de calor até 24 horas (águas relacionadas à serragem)	67
Figura 4.17: Curvas de calor acumulado (águas relacionadas à serragem).....	68
Figura 4.18 Curvas de liberação de calor até 24 horas (águas relacionadas ao bambu) 69	
Figura 4.19: Curvas de calor acumulado (águas relacionadas ao bambu).....	71
Figura 4.20: Curvas de liberação de calor até 24 horas.....	72
Figura 4.21: Curvas de calor acumulado durante 69 horas de ensaio	73
Figura 4.22: Curvas de velocidade do pulso ultrassônico <i>versus</i> tempo.....	74

Figura 4.23: Elevação adiabática de temperatura a) Escala linear b) Escala logarítmica	76
Figura 4.24: Elevação adiabática de temperatura em escala linear	78
Figura 4.25: Elevação adiabática de temperatura em escala logarítmica	79
Figura 4.26: Imagens de MEV da superfície das partículas da serragem de madeira a) Serragem tratada com água b) Serragem tratada com Ca(OH)_2 c) Serragem tratada com CaCl_2	80
Figura 4.27: EDS a) Amostra tratada com Ca(OH)_2 b) Amostra tratada com CaCl_2	81
Figura 4.28: Imagens de MEV do bioconcreto a) Serragem tratada com água b) Serragem tratada com Ca(OH)_2 c) Serragem tratada com CaCl_2	84
Figura 4.29: Consumo de água para bioconcretos de serragem a) Indicador calorimetria isotérmica b) Indicador UCA	85
Figura 4.30: Mudanças climáticas a) Indicador calorimetria isotérmica b) Indicador UCA.....	86

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Composição química da madeira.....	7
Tabela 2.2: Processos de separação por membranas comerciais.....	14
Tabela 3.1: Massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade	24
Tabela 3.2: Índices de angularidade e limites de classificação (AL ROUSAN, 2004)..	26
Tabela 3.3: Resultado da composição química	33
Tabela 3.4: Composição química e densidade dos materiais cimentícios.....	34
Tabela 3.5: Temperaturas e tempos de imersão	36
Tabela 3.6: Nomenclatura utilizada para o ensaio de calorimetria isotérmica.....	44
Tabela 3.7: Nomenclatura utilizada para os ensaios de hidratação do bioconcreto	46
Tabela 3.8: Consumo em materiais do bioconcreto	47
Tabela 3.9: Consumo em materiais do bioconcreto	49
Tabela 4.1: Porcentagem de extrativos solubilizados.....	53
Tabela 4.2: Extrativos solubilizados para diferentes valores de m_s/m_a	54
Tabela 4.3: Dados dos períodos de hidratação (águas relacionadas à serragem)	67
Tabela 4.4: Calor total acumulado durante a calorimetria isotérmica.....	69
Tabela 4.5: Dados dos períodos de hidratação (águas relacionadas ao bambu).....	70
Tabela 4.6: Calor total acumulado durante a calorimetria isotérmica.....	71
Tabela 4.7: Patamar de percolação e inclinação da região intermediária das reações de hidratação.....	74
Tabela 4.8: Resultados dos testes de elevação adiabática de temperatura	77
Tabela 4.9: Resultados dos testes de elevação adiabática de temperatura	78

1 Introdução

Existe um crescente interesse no desenvolvimento de materiais sustentáveis para a construção civil como forma de diminuir os impactos ambientais causados por este setor. Ghavami (1989), Toledo Filho (1997), Amziane & Sonebi (2016) citam que a emissão de gases do efeito estufa, o consumo de energia, o consumo de recursos naturais e a produção de resíduos como as principais preocupações que levaram pesquisadores de todo o mundo a estudarem soluções alternativas aos materiais convencionais nas construções. Dentre esses materiais, os bioconcretos, que associam matrizes inorgânicas a biomassas vegetais, têm sido apontados como soluções bastante atrativas, já que possuem propriedades hidro-térmicas, o que pode aumentar a eficiência energética e a qualidade do ar das edificações e armazenam CO₂, o que pode contribuir para redução das mudanças climáticas (CALDAS *et al.*, 2017; FLORENTIN, 2017).

O Brasil possui uma grande área florestal (aproximadamente 494 milhões de hectares), correspondendo a 12% das florestas do mundo, ocupando a segunda posição no ranking da FAO (*Food and Agriculture Organization*, 2016) e possui crescente demanda por madeira desdobrada, o que tem acarretado uma geração de resíduos cada vez maior. Segundo Finotti *et al.* (2006), de 20% a 40% do volume das toras de madeira é desperdiçado durante o seu processamento. Isso acontece, entre outros fatores, devido à falta de qualidade da matéria-prima florestal, mudança geométrica do produto e escolha incorreta das ferramentas de corte. Os resíduos compreendem as cascas, aparas da plaina e do corte, serragem e pó de serra e foram estimados em 30 milhões de toneladas /ano por Tuoto (2009), consultor do Ministério do Meio Ambiente.

Segundo Yuba (2001), a eliminação desses resíduos é um problema, pois as serrarias não têm mercado consumidor para o volume gerado, apesar de serem usados na produção de painéis MDF e aglomerados. Assim, a deposição sobre o solo na própria área industrial das empresas, a queima, a venda sem valor agregado ou a doação para utilização em aviários são algumas das soluções empregadas para estes resíduos. Apesar da serragem de madeira ser um resíduo natural, sua deposição diretamente no solo é prejudicial devido ao tempo necessário para sua degradação e à presença de extrativos, que podem atingir níveis tóxicos para as plantas (RECH, 2002).

Por ser intensiva no uso de matéria-prima, a indústria da construção civil pode ser uma boa alternativa para o uso desses resíduos e vários autores já avaliaram a viabilidade do uso da serragem de madeira como agregado na produção de bioconcretos (LATORRACA, 2000; PIMENTEL, 2000; SANTOS *et al.*, 2008; DA GLORIA, 2015). Um consenso entre os autores estudados é que existe a necessidade de um pré-tratamento para melhorar a compatibilidade entre bioagregado e matriz cimentícia devido à presença de extrativos (resinas, ácidos graxos, terpenos, açúcares simples, compostos fenólicos) na biomassa. Porém, são sugeridas diferentes metodologias de pré-tratamento.

Pimentel (2000) utilizou um pré-tratamento por imersão das partículas de madeira em água a 80 °C por um período de uma hora utilizando a razão biomassa:água de 1:10. Este mesmo processo foi utilizado por trabalhos mais recentes, como o de Da Gloria (2015) e Andreola (2017). Okino *et al.* (2004), por sua vez, ferveram partículas de madeira em água por aproximadamente 4 horas. Santos *et al.* (2008) optaram pela imersão em água fria por um período de 24 horas, agitando-se as partículas periodicamente. Soroushian & Hassan (2012) utilizaram imersão da palha de trigo triturada em solução saturada com cal a 95 °C por 6 horas e razão biomassa:água de 1:10. Entretanto, Quiroga *et al.* (2016) citaram em seu trabalho que não existem estudos suficientes sobre pré-tratamentos em partículas de madeira da América do Sul.

Os estudos relatados mostram a grande diferença existente entre os métodos de pré-tratamento utilizados. Não existe nenhum consenso sobre a temperatura, tempo de imersão e razão biomassa:água entre os pesquisadores. Além disso, alguns utilizam soluções alcalinas e outros não. Sendo assim, esta pesquisa estudará a otimização do pré-tratamento da biomassa, visando um menor gasto energético e de água no processo conforme será descrito nos objetivos abaixo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Esta pesquisa tem por objetivo estudar diferentes pré-tratamentos para retirada dos extrativos da serragem de madeira e a avaliação do efeito desses tratamentos na hidratação de bioconcretos de madeira.

1.1.2 Objetivos específicos

Esta pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da temperatura (25, 60, 80, 85, 90 e 95 °C) e do tempo de imersão (0,5; 1; 2; 24 e 48 horas) para o pré-tratamento da serragem de madeira;
- Estudar diferentes razões massa de serragem/volume de água (1:10, 1:5 e 1:4);
- Estudar o efeito da adição de cloreto de cálcio (4%) e hidróxido de cálcio (solução saturada) na remoção dos extrativos;
- Avaliar os processos de separação por membranas (PSM) como tratamento da água residual da lavagem visando o seu reuso para produção de bioconcretos.

1.2 Organização da pesquisa

Esta pesquisa será apresentada em cinco capítulos:

Capítulo 1: Breve introdução ao tema com exposição dos objetivos gerais e específicos e a organização do trabalho.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre a composição química da madeira, bioconcretos com biomassa vegetal e matriz cimentícia e compatibilidade química entre serragem de madeira e matriz cimentícia. Inclui também uma pequena revisão sobre sistema de membranas, nanofiltração e osmose inversa.

Capítulo 3: Apresentação da caracterização dos materiais utilizados e descrição do programa experimental para a avaliação da compatibilidade química entre serragem de madeira e matriz cimentícia.

Capítulo 4: Tratamento e discussão dos resultados obtidos no programa experimental.

Capítulo 5: Conclusões sobre os resultados obtidos nesta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 A madeira

2.1.1 Estrutura do tronco da árvore

Segundo Thomas (2004) e o *Forest Products Laboratory* (2010), o tronco é um dos elementos que tornam as árvores diferentes das outras plantas. Ele tem a função de levar água das raízes até as folhas e transportar o alimento por toda a planta, mantendo-a viva. Observando a Figura 2.1, começando de fora para dentro, o tronco é constituído pelas seguintes camadas:

- Casca: camada à prova d'água que protege mecanicamente o floema;
- Floema: tecido vivo que transporta os produtos da fotossíntese das folhas para o restante da árvore;
- Câmbio: tecido responsável pelo crescimento dos anéis, tornando o tronco cada vez mais espesso;
- Alburno: conduz água ou seiva bruta da raiz para as folhas;
- Cerne: parte central que é responsável pelo suporte da árvore. Sua formação ocorre espontaneamente através de reações químicas que o tornam mais resistente ao apodrecimento;
- Medula: presente no centro de algumas árvores. É o tecido mole e esponjoso remanescente do broto, antes da formação da árvore.

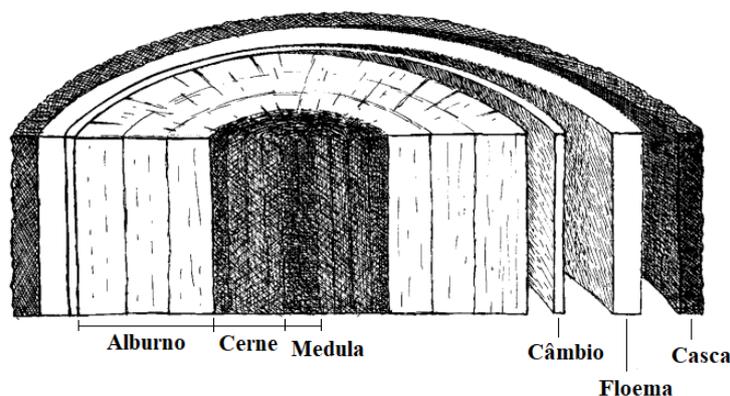


Figura 2.1: Seção transversal de um tronco de árvore

(Adaptada de THOMAS, 2004)

Devido à sua heterogeneidade, com células organizadas em diferentes direções, a aparência do material muda de acordo com o plano de corte escolhido, conforme representado na Figura 2.2 (BOTOSSO, 2009):

- Transversal: perpendicular ao eixo da árvore;
- Longitudinal radial: paralelo aos raios ou perpendicular aos anéis de crescimento;
- Longitudinal tangencial: tangencial aos anéis de crescimento, ou perpendicular aos raios.

Os comportamentos físico e mecânico da madeira também são diferentes nessas três direções, sendo assim, ela é definida como um material anisotrópico.

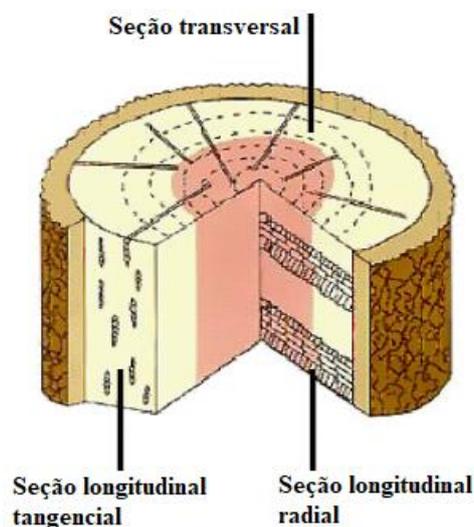


Figura 2.2: Planos de corte de um tronco de árvore

(Adaptada de BOTOSSO, 2009)

2.1.2 Classificação das árvores

De forma geral, as árvores podem ser classificadas em dois grupos distintos: folhosas (*hardwood*) e coníferas (*softwood*), como ilustrado na Figura 2.3. As folhosas se originam das angiospermas, que são plantas que produzem flores e frutos, como carvalhos, eucaliptos e jacarandás. As coníferas vêm das árvores gimnospermas, que são aquelas plantas que possuem sementes nuas, como araucárias e pinheiros (RAMAGE *et al.*, 2017).

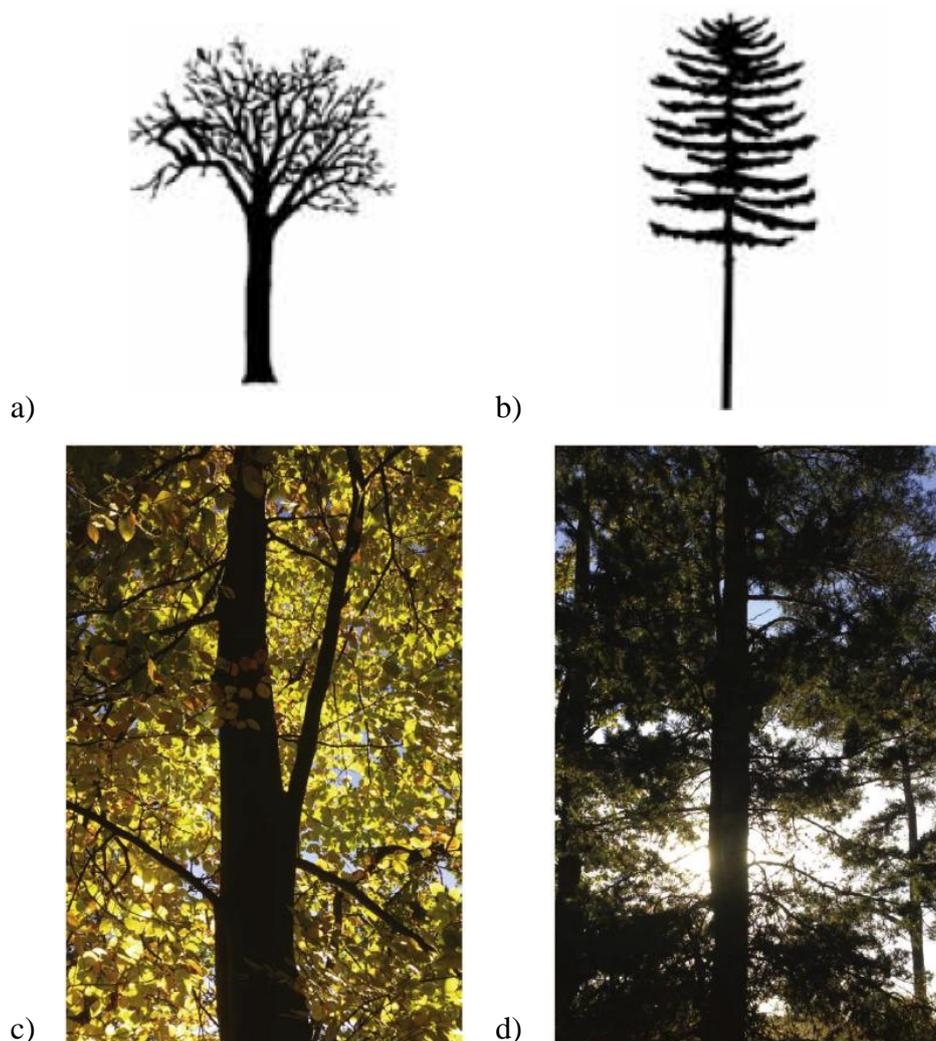


Figura 2.3: Forma geral das árvores a) Folhosas b) Coníferas c) Exemplo de folhosa - Faia d) Exemplo de conífera - Pinheiro

(Adaptado de *Forest Products Laboratory*; 2010; RAMAGE *et al.*, 2017)

2.1.3 Composição química da madeira

Os componentes químicos da madeira podem ser divididos em dois grupos: estrutural (celulose, hemicelulose e lignina) e não-estrutural (extrativos e cinzas). Os componentes estruturais são encontrados nas paredes celulares e são responsáveis pela forma das células e maioria das propriedades físicas e químicas da madeira. Em contrapartida, os elementos não-estruturais podem ser encontrados no lúmen, em cavidades celulares ou canais e englobam uma grande variedade de compostos com baixa massa molecular, alguns polímeros e uma pequena porcentagem (<1%) de cinzas (PEREIRA *et al.*, 2003). As variações das quantidades e características de cada um desses componentes resultam em madeiras com propriedades diferentes (SOUZA, 2006). Devido à variabilidade

natural da madeira, a composição química desta citada na literatura é variável, como apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição química da madeira

Autor	Holocelulose*	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos
Mazzanti (2015)	-	40-50%	15-35%	20-40%	5%
Coníferas: Klock & Andrade (2013)	-	42±2%	27±2%	28±2%	5±3%
Folhosas: Klock & Andrade (2013)	-	45±2%	30±5%	20±4%	3±2%
<i>Forest Products Laboratory</i> (2010)	55-65%	-	-	20-30%	<10%
Rowell <i>et al.</i> (2005)	65-75%	-	-	18-35%	-
Thomas (2004)	-	40-55%	25-40%	18-35%	-
Pereira <i>et al.</i> (2003)	-	40-50%	20-30%	20-35%	0-10%

* Holocelulose: soma da celulose e hemicelulose.

A celulose, que é o principal componente da madeira, é constituída por carbono, hidrogênio e oxigênio. Átomos destes elementos se juntam, formando longas cadeias de β -D-glucose. A união de moléculas adjacentes de glucose é possível após a eliminação de uma molécula de água, formando a celobiose (PEREIRA *et al.*, 2003), sendo esta a unidade que se repete na formação da celulose, como ilustrado na Figura 2.4.

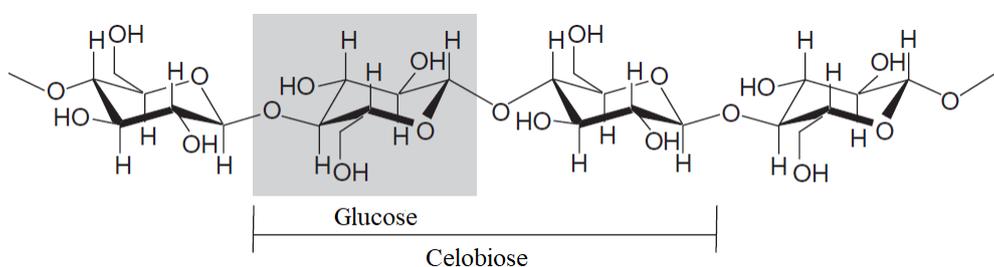


Figura 2.4: Estrutura química da celobiose

(Adaptado de PEREIRA *et al.*, 2003)

O número de unidades de glucose presentes na molécula de celulose define o seu grau de polimerização. Na madeira, esse valor varia entre 9.000 e 10.000, podendo chegar a 15.000 (ROWELL, 2005). De acordo com Pereira *et al.* (2003), a celulose está diretamente associada à resistência à tração longitudinal e à flexão da madeira, devido às ligações covalentes entre moléculas nessa direção.

Diferentemente da celulose, a hemicelulose possui várias moléculas básicas (mannose, galactose, xilose, arabinose, ácido glucorônico, etc), conforme Figura 2.5, e seu grau de polimerização varia entre 50 e 300. É altamente higroscópica, sendo responsável por grande parte dos fenômenos de adsorção e inchamento da madeira (MORESCHI, 2014).

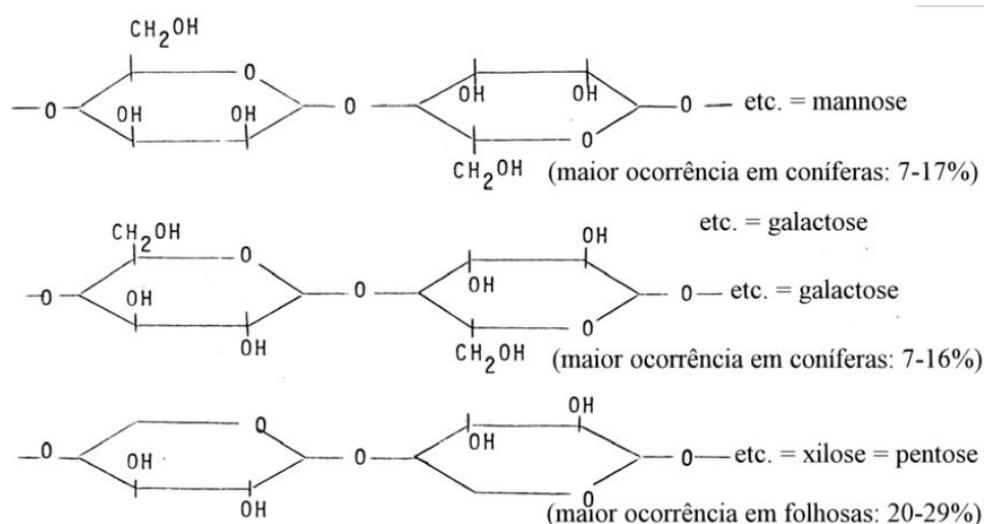


Figura 2.5: Algumas unidades básicas da hemicelulose (MORESCHI, 2014)

A lignina é um polímero amorfo, altamente complexo, tridimensional e composto principalmente por unidades aromáticas, conforme ilustrado na Figura 2.6 (ROWELL *et al.*, 2005). Não tem afinidade com a água e preenche os espaços existentes entre moléculas de celulose e hemicelulose (MAGNIONT & ESCADEILLAS, 2017). Também está diretamente associada à resistência à compressão da madeira e mudanças em sua constituição podem afetar essa propriedade (PEREIRA *et al.*, 2003).

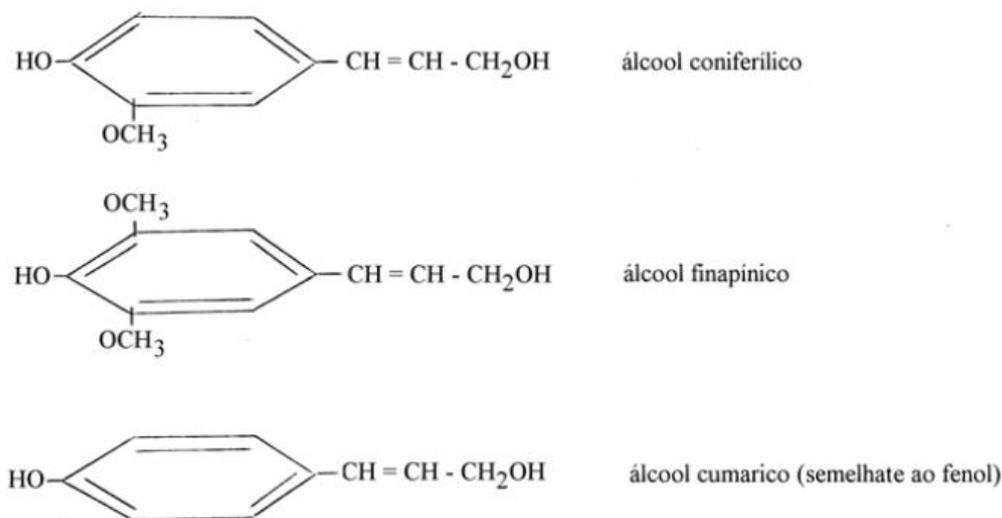


Figura 2.6: Principais cadeias constituintes da lignina (MORESCHI, 2014)

Os extrativos da madeira são moléculas com baixa ou média massa molecular que recebem esse nome pela possibilidade de serem removidos por extração com algum solvente, como água, álcool, tolueno ou éter (PEREIRA *et al.*, 2003; ROWELL *et al.*, 2005). Sua composição e quantidade dependem de fatores como espécie, idade e região de procedência, podendo ter variações inclusive ao longo da mesma planta. Extrativos são responsáveis por algumas características da madeira, como cor, cheiro, resistência ao apodrecimento, gosto e propriedades abrasivas. Gorduras, ceras, ácidos graxos, álcoois, esteróides, terpenos, lignanas, estilbenos, flavonóides e outros aromáticos são algumas das substâncias encontradas nos extrativos (KLOCK & ANDRADE, 2013).

2.2 Bioconcreto de biomassa vegetal e matriz cimentícia

O bioconcreto é constituído por uma matriz inorgânica em conjunto com partículas de biomassas vegetais, como bambu, madeira e cânhamo ou resíduos agroindustriais, como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, caules de milho e trigo (BERALDO, 2011). A matriz normalmente é composta por cimento Portland ou cal aérea ou hidratada, geralmente associados com materiais pozolânicos como cinza volante, escória de alto forno e metacaulinita (AMZIANE, 2016).

A produção de bioconcretos pode combinar vantagens tanto da madeira como do cimento. A madeira confere ao material uma maior leveza, boas características acústicas e de isolamento térmico. A densidade de bioconcretos com serragem de madeira varia entre 700 e 1200 kg/m³ (DIQUÉLOU, 2015). O cimento atua na estabilidade

dimensional e resistência ao fogo e a agentes biodegradadores, ao se comparar com a madeira (HACHMI & MOSLEMI, 1989; FRYBORT *et al.*, 2008). Pereira *et al.* (2006) também citam como vantagens do produto final a facilidade de corte e perfuração.

Como desvantagens, pode-se destacar: incompatibilidade química entre o material vegetal e o cimento; problemas relacionados à estabilidade dimensional na presença de variação de umidade quando comparados a outros produtos à base de cimento; suscetibilidade à formação de eflorescências (BERALDO, 2011).

Quanto a sua aplicação, bioconcretos podem ser utilizados em telhados, estruturas pré-fabricadas, formas permanentes, barreiras acústicas, além de painéis isolantes e na confecção de casas de baixo custo (FAN, 2012)

2.3 Compatibilidade química entre cimento e madeira

2.3.1 Problema de incompatibilidade química

A serragem de madeira e o cimento são ditos compatíveis se a presença deste material lignocelulósico não interferir na pega e no endurecimento do cimento após a adição de água à mistura (JORGE *et al.*, 2004). Os principais responsáveis pela inibição do processo de hidratação do cimento são os compostos classificados como extrativos (resinas, ácidos graxos, terpenos, açúcares simples, compostos fenólicos) e hemiceluloses, que podem ser degradadas pela alta alcalinidade da pasta hidratada e liberar subprodutos (PEREIRA *et al.*, 2006; VAICKELIONIS & VAICKELIONIENE, 2006). Entretanto, é importante ressaltar que diferentes compostos e quantidades podem causar diferentes efeitos na pega e no endurecimento da matriz cimentícia (FAN *et al.*, 2012; NA *et al.*, 2014).

De acordo com Sandermann e Brendel (1956), citados por Na *et al.* (2014), 0,50 % (em relação à massa de cimento) de frutose não afeta a pega do cimento, enquanto 0,25 % de glucose pode inibir completamente as suas reações de hidratação. Alguns açúcares podem inclusive causar um efeito contrário, como a rafinose, que em uma concentração de 0,125 % pode melhorar as propriedades do cimento. Miller e Moslemi (1991b) observaram que somente 0,1 % de hemicelulose já foi suficiente para influenciar a hidratação de pastas de cimento e diminuir sua resistência à compressão.

Os componentes químicos da madeira em si não reagem diretamente com o cimento (HACHMI *et al.*, 1990), porém Na *et al.* (2014) citam dois possíveis mecanismos de ação da madeira que afetam a hidratação do cimento Portland. O primeiro seria a formação de complexos químicos entre compostos orgânicos dos extrativos e os íons Ca^{2+} , o que levaria a uma diminuição desses íons no sistema e conseqüente retardo na formação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e C-S-H (MILLER & MOSLEMI, 1991a). O segundo seria a formação de uma camada adsorvida pelos compostos orgânicos na superfície dos grãos de cimento não hidratados e de produtos de hidratação, formando uma barreira temporária para o processo de hidratação (JUENGER & JENNINGS, 2002).

2.3.2 Tratamentos para melhorar a compatibilidade biomassa-cimento

Vários métodos podem ser empregados para melhorar a compatibilidade entre matriz cimentícia e serragem de madeira. Beraldo & Carvalho (2004) testaram variáveis como época de corte das árvores (primavera e inverno), armazenamento das partículas (protegidas ou não), uso do material *in natura* e lavado por imersão em água quente (80 °C por duas horas), utilização de cimento CP II-E-32 e CP V-ARI, efeito da idade da tora e da posição no tronco (base, meio e topo) que o material se origina. Após ensaios de compressão uniaxial e análise dos resultados, pode-se concluir que os melhores resultados foram obtidos em bioconcretos fabricados com cimento CP V-ARI e partículas cujo corte das árvores foi efetuado durante o inverno. As demais variáveis não afetaram significativamente os resultados.

Lima (2005) utilizou partículas de madeira secas em estufa (24 horas a 90 °C), imersas em água fervente por 45 minutos seguida de imersão em água a 27,5 °C pelo mesmo tempo na concentração de 50 gramas de serragem por litro de água e mineralização com sulfato de alumínio. Após avaliação dos bioconcretos, os tratamentos por imersão em água e mineralização foram considerados equivalentes.

Iwakiri *et al.* (2012) fabricaram bioconcretos utilizando partículas de madeira sem tratamento, imersas em água fria por 24 horas, em água quente por 6 horas e em solução de NaOH 1% por 2 horas. Depois de realizados ensaios mecânicos foi constatado que o melhor tratamento foi a imersão em água quente. Além dos tratamentos citados anteriormente, Iwakiri *et al.* (2015) trataram as partículas também

com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e constataram que este tratamento apresentou o melhor comportamento em relação aos anteriores.

Matoski *et al.* (2013) estudaram o efeito da adição de diferentes aceleradores de pega (CaCl_2 , MgCl_2 , Al_2SO_4 e Na_2SiO_4) em bioconcretos com madeira e concluíram que os melhores resultados foram obtidos ao se utilizar os cloretos de cálcio e magnésio.

Castro *et al.* (2014) testaram 6 tratamentos diferentes em partículas de madeira: partículas *in natura*, imersas por 24 h em água fria, imersas por 6 h em água a 60 °C, imersas em solução alcalina (1% NaOH) por 2 h, adição de 3% de cloreto de cálcio e imersas em cal hidratada (relação 1:1). Dentre todos esses tratamentos, o que se mostrou mais efetivo para reduzir a inibição foi adição de 3% de cloreto de cálcio no bioconcreto.

Quiroga *et al.* (2016) testaram imersão em água, em solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e recobrimento com estireno acrílico. No primeiro método foram utilizadas temperaturas de 25; 62,5 e 100 °C e tempos de imersão de 5, 25 e 45 min. No segundo, os tempos utilizados de imersão foram 4, 24 e 72 horas e concentrações de 5,6; 11,1 e 22,2 g/l. Para ambos os tratamentos foram testadas relações massa de água/massa de madeira iguais a 20, 30 e 40. Nos testes com recobrimento, as partículas foram mantidas imersas por 5 min. Após a realização de todos os testes, concluiu-se que todos os tratamentos são estratégias eficientes para inibir o efeito dos extrativos na pega e no endurecimento do bioconcreto.

2.3.3 Métodos para análise da interação química entre cimento e bio-agregados

A compatibilidade entre madeira e matriz cimentícia pode ser verificada através de diferentes métodos. Um método muito difundido é a determinação da elevação de temperatura do bioconcreto durante a sua hidratação em função do tempo. Para isto, o material fresco é colocado em um sistema semi-adiabático e as medições de temperatura são realizadas por um período de 24 horas (KARADE *et al.*, 2003). Com os resultados, diversos autores sugeriram índices para avaliar a compatibilidade entre cimento e madeira.

Wei *et al.* (2000) utilizaram a temperatura máxima (T_{max}) e o tempo transcorrido até ela ser atingida (t_{max}) para sugerir uma classificação a partir das espécies de seu estudo. Os intervalos sugeridos para análise de compatibilidade foram: $T_{max} > 50$ °C e $t_{max} < 10,2$ h para pouco inibidoras, $T_{max} > 40$ °C e $t_{max} < 14,7$ h para inibidoras intermediárias e $T_{max} < 40$ °C e $t_{max} > 14,7$ h para altamente inibidoras. A utilização de T_{max} é uma ferramenta simples para avaliação da compatibilidade entre cimento e madeira, porém deve ser utilizada com cautela, pois pode ser afetada por vários parâmetros de ensaio, como calorímetro, tipo de cimento, tamanho da partícula da madeira e energia de mistura (KARADE *et al.*, 2003).

O fator C_A , sugerido por Hachmi e Moslemi (1989) é definido como a razão entre a área do gráfico de uma mistura entre cimento, madeira e água e a área do gráfico de uma pasta de cimento. Para determinação deste fator é considerada a curva obtida em um sistema semi-adiabático, entre os tempos de 3,5 e 24 horas. As espécies que apresentarem resultados próximos a 1 são consideradas compatíveis e próximos a 0 incompatíveis.

Bertolini *et al.* (2014) e Castro *et al.* (2014) concluíram que a resistência à compressão de bioconcretos é um bom indicador da compatibilidade entre madeira e matriz cimentícia.

Dong *et al.* (2016) analisaram os efeitos de duas espécies de madeira na hidratação de cimento Portland através de ensaios como difração de raio x, análise termogravimétrica e microscopia eletrônica. Através destes ensaios foi possível identificar em diferentes idades os produtos de hidratação formados em misturas com adição de cada espécie.

2.4 Tratamento da água residual por processo de separação por membranas

2.4.1 Considerações iniciais

Os processos de separação por membranas (PSM) é uma das técnicas utilizadas para o tratamento de águas e efluentes, como forma de aumentar a eficiência do tratamento e reduzir o tempo de operação. Eles são muito utilizados também na indústria alimentícia para o fracionamento do leite e proteínas e purificação de solventes (FARRUGIA, 2012).

Um obstáculo para a implantação dos PSM é o seu custo, porém deve-se levar em consideração que estes processos exigem uma área para implementação muito menor que os sistemas convencionais de tratamento de efluentes, o que os torna vantajosos (FARRUGIA, 2012). A Tabela 2.2 contém descritos os PSM comerciais.

Tabela 2.2: Processos de separação por membranas comerciais
(Adaptado de HARBERT, 2006)

Processo	Força motriz	Material retido	Material que permeia	Aplicações
Microfiltração (MF)	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em suspensão, bactérias. Massa molar > 500k Da (0,01 μm)	Água e sólidos dissolvidos	Esterilização bacteriana; clarificação de vinhos e cervejas
Ultrafiltração (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Colóides, macromoléculas. Massa molar > 5000 Da	Água (solvente), sais solúveis de baixa massa molar	Fracionamento / concentração de proteínas; recuperação de pigmentos / óleos
Nanofiltração (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de massa molar. Média 500 < MM < 2000 Da	Água, sais e moléculas de baixa massa molar	Purificação de enzimas; biorreatores a membrana
Osmose Inversa (OI)	ΔP (15 – 80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão	Água (solvente)	Dessalinização e desmineralização de águas
Diálise (D)	ΔC	Moléculas de massa molar > 5000 Da	Íons e orgânicos de baixa massa molar	Hemodiálise; rim artificial, recuperação de NaOH
Eletrodiálise (ED)	ΔE	Macromoléculas e compostos não iônicos	Íons	Concentração de soluções salinas; purificação de águas
Permeação de Gases (PG)	$\Delta P \Rightarrow \Delta C$	Gás menos permeável	Gás mais permeável	Recuperação de hidrogênio; fracionamento do ar
Pervaporação (PV)	Pressão de vapor	Líquido menos permeável	Líquido mais permeável	Desidratação de álcoois.

As membranas de MF e UF podem ser empregadas como pré-tratamento para a NF e a OI, pois retêm materiais em suspensão (HARBERT *et al.*, 2006).

2.4.2 Tecnologia de membranas

O termo membrana pode ser definido como uma barreira que separa duas fases e restringe, total ou parcialmente, o transporte dos componentes presentes nelas (HARBERT *et al.*, 2006). Suas propriedades e estruturas variam muito, podendo ser homogêneas ou heterogêneas, carregadas ou não, sintéticas ou naturais, finas ou espessas. A Figura 2.7 apresenta um esquema que classifica as membranas de acordo com o material com o qual elas são fabricadas (BÉLAFI-BAKÓ *et al.*, 2000).

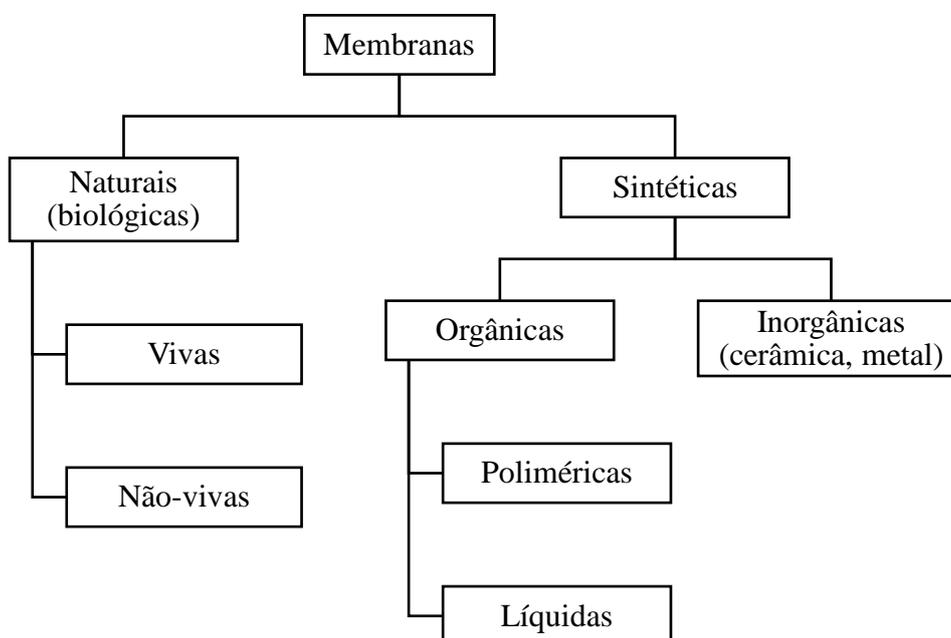


Figura 2.7: Classificação das membranas

As membranas também podem ser classificadas como isotrópicas (com a composição e estrutura uniformes) ou anisotrópicas (heterogêneas), conforme ilustrado na Figura 2.8. As membranas isotrópicas podem ser microporosas (com poros de diâmetro de 0,01 a 10 μm), densas (sem poros) e carregadas eletricamente (as paredes dos poros possuem cargas positivas ou negativas). As anisotrópicas são aquelas membranas que possuem uma camada superficial muito fina, seguida por uma subestrutura porosa (BAKER, 2004).

Membranas simétricas

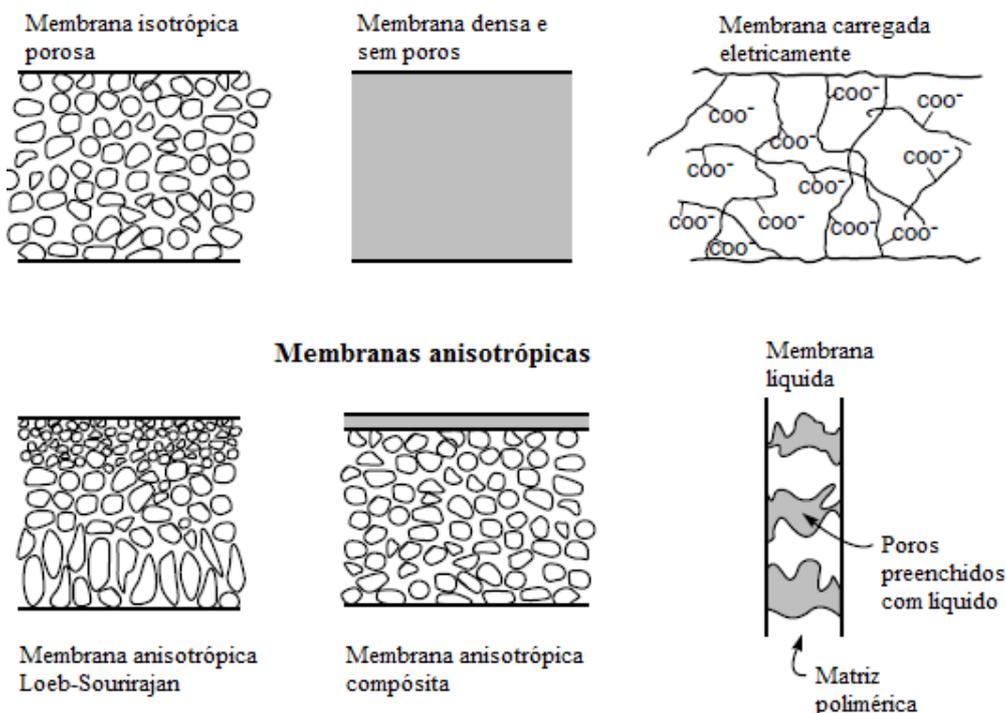


Figura 2.8: Diagramas esquemáticos dos principais tipos de membranas

(Adaptado de BAKER, 2004)

Para que ocorra o transporte de uma espécie por uma membrana é necessária uma força motriz agindo sobre ela. Processos de tratamento de efluentes normalmente utilizam a diferença de pressão ou gradiente de concentração como força motriz. Microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI) são exemplos de processos que utilizam diferença de pressão (HARBERT *et al.*, 2006).

Nestes processos cuja força motriz é a diferença de pressão, o Coeficiente de Rejeição (R) é um parâmetro muito importante. Ele é definido pela razão entre concentração da espécie na alimentação (C_0) e a concentração no permeado (C_p) (Equação 2.1). O valor de R igual a zero representa que a membrana não tem nenhuma capacidade seletiva e R igual a 1 significa que a membrana foi capaz de rejeitar a espécie completamente (HARBERT *et al.*, 2006).

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_0} \quad (2.1)$$

2.4.3 Osmose inversa

A osmose inversa (OI) é um processo de separação de misturas no qual são utilizadas membranas semipermeáveis. Neste caso, elas retêm moléculas de baixa massa molar, como pequenas moléculas orgânicas ou sais inorgânicos e permitem a passagem do solvente (HARBERT *et al.*, 2006). Este processo é indicado para produzir água para processos industriais (caldeiras, torres de resfriamento), água potável, água desmineralizada para a formulação de bebidas, água reutilizável a partir de efluentes tratados, dentre outros (FARRUGIA, 2013).

Em um processo de osmose convencional, há um fluxo de solvente no sentido solução diluída para solução concentrada, impulsionado por uma diferença de pressão osmótica através da membrana. Por essa razão, para haver uma separação entre soluto e solvente, deve-se aplicar uma pressão no sistema maior que a pressão osmótica de alimentação, favorecendo a passagem do solvente para a região de menor concentração, como ilustrado na Figura 2.9 (BÉLAFI-BAKÓ *et al.*, 2000).

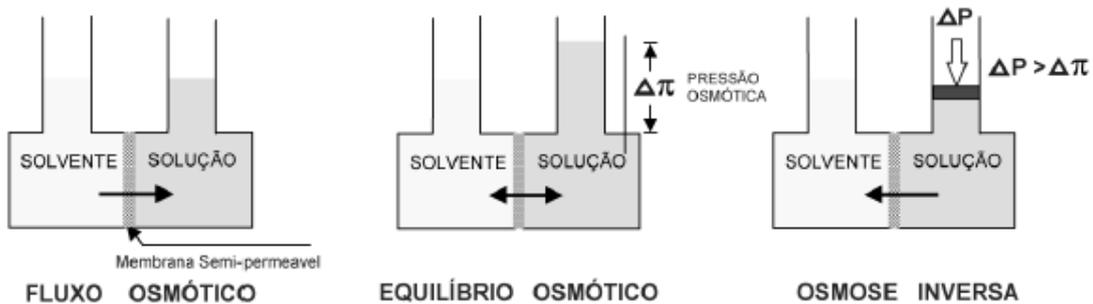


Figura 2.9: Processos de osmose e osmose inversa

(Adaptado de HARBERT *et al.*, 2006)

A principal aplicação da osmose inversa é em casos onde a concentração de sais precisa ser reduzida drasticamente.

2.4.4 Nanofiltração

Na nanofiltração são utilizadas membranas com tamanho de poros de aproximadamente 1 nanômetro de diâmetro, permitindo a passagem de cátions e ânions monovalentes e retraindo moléculas orgânicas de baixa massa molecular e íons bivalentes (BÉLAFI-BAKÓ *et al.*, 2000).

Este processo é usado em plantas de tratamento industrial como processo principal ou de polimento: papel e celulose, corantes etc., na indústria alimentícia, farmacêutica, têxtil, mineração e petróleo e gás, no tratamento de água e no abastecimento de água em cidades. É utilizado também em tratamentos de efluentes, na remoção de cor e DQO (Demanda Química de Oxigênio) (RUBIM, 2019).

2.5 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

2.5.1 Aspectos gerais

A avaliação do ciclo de vida (ACV) permite uma estimativa dos potenciais impactos ambientais das principais etapas de um produto, sistema ou processo, iniciando-se na extração da matéria-prima e encerrando-se na sua disposição final. Seu cálculo pode proporcionar a identificação de oportunidades de melhorias no desempenho ambiental de produtos, levantamento dos limites do processo produtivo de algum produto, orientações no projeto e design de novos produtos, comparação das características ambientais, entre outras vantagens (SILVA, 2005).

2.5.2 Definição de objetivo e escopo

O objetivo deve deixar claro a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo e o público-alvo ao qual os resultados serão apresentados. O escopo deve englobar o produto a ser estudado, a unidade funcional, a fronteira do sistema, procedimentos de alocação, requisitos de dados, entre outros fatores (NBR ISO 14040/2009).

A função da unidade funcional é assegurar a comparabilidade dos resultados de ACV, pois possibilita a normalização dos dados de entrada e saída. Possibilita também a comparação de resultados de diferentes estudos (NBR ISO 14040/2009).

De acordo com Silva (2013), as fronteiras podem ser classificadas da seguinte forma:

- “Berço ao berço”: considera desde a extração das matérias-primas até a destinação dos resíduos, no caso deles serem incorporados à fase inicial de outros processos produtivos;

- “Berço ao túmulo”: considera os impactos ambientais em todos os estágios do ciclo de vida de produtos, desde a extração da matéria-prima até a sua disposição final;
- “Berço ao portão”: considera desde a extração da matéria-prima e produção do material, até a finalização do produto pela indústria;
- “Portão ao portão”: considera apenas a fase realizada no interior da indústria.

2.5.3 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Esta etapa as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto são quantificadas a partir da coleta de dados e dos procedimentos de cálculo. Como se trata de um processo iterativo, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificadas à medida que o conhecimento sobre o sistema é ampliado (NBR ISO 14040/2009). Alguns exemplos de dados a serem coletados são:

- Entradas de energia, de matéria-prima, auxiliares ou outras entradas físicas;
- Produtos, co-produtos e resíduos;
- Emissões atmosféricas, descargas para a água e solo e outros aspectos ambientais.

Os procedimentos de cálculo da análise de inventário incluem validação dos dados coletados, correlação destes dados aos processos elementares e correlação aos fluxos de referência e à unidade funcional (NBR ISO 14040/2009).

2.5.4 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

A avaliação da significância dos potenciais impactos ambientais relativos ao produto ou ao processo é feita a partir dos resultados obtidos na etapa de inventário. De acordo com a NBR ISO 14044 (2009), os elementos obrigatórios da fase de AICV são:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

Nesta etapa também pode ser incluída uma análise crítica do objetivo e escopo do estudo de ACV, verificando se os objetivos foram atingidos ou modificando-os, caso a avaliação indique que eles não podem ser alcançados (NBR ISO 14040/2009).

2.5.5 Interpretação do ciclo de vida

Nesta fase as constatações feitas na análise de inventário e na avaliação de impacto são consideradas em conjunto. É importante que os resultados fornecidos por esta fase sejam consistentes com ambos objetivo e escopo definidos previamente e que levem a conclusões, expliquem limitações e forneçam recomendações (NBR ISO 14040/2009).

2.5.6 Estudos de ACV em bioconcretos

Estudos mostram que bioconcreto de cânhamo e cal pode ser considerado um material carbono negativo devido dois fatores: a) o cânhamo tem uma alta taxa de sequestro de CO₂ durante seu crescimento; b) a cal reabsorve CO₂ durante a vida útil do prédio. Assim, este material tem uma taxa absorvida de gás carbônico maior do que a emitida durante sua produção e uso (FLORENTIN, 2017).

Edwin *et al.* (2014) avaliaram o uso de argamassa de cimento e bambu em substituição a argamassas convencionais. Seu estudo mostrou que a argamassa de cimento e bambu apresentou um melhor desempenho ambiental. La Rosa *et al.* (2014) compararam o uso de painéis granulares de sobreiro com painéis de resina. Este trabalho mostrou que os painéis de sobreiro também apresentaram melhor comportamento ambiental.

No caso de bioconcretos com serragem de madeira, grande quantidade de água é gasta no pré-tratamento da biomassa, então o consumo de água e sua escassez são indicadores ambientais importantes a serem avaliados (CALDAS *et al.*, 2019).

3 Materiais e procedimentos experimentais

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Serragem de madeira

Nesta pesquisa foram utilizados resíduos de madeira recolhidos na forma de serragem na madeira Madeirama, situada na cidade do Rio de Janeiro. Esses resíduos provêm da mistura aleatória das espécies Angelim Pedra, Cedro, Cedrinho e Maçaranduba.

A serragem adquirida foi peneirada em peneirador mecânico, utilizando-se a peneira de malha de 1,18 mm para retirada dos finos, pois estes poderiam absorver mais água da mistura do bioconcreto a ser produzido e afetar a reologia das misturas. A Figura 3.1.a ilustra a fração utilizada na pesquisa e a Figura 3.1.b a parte descartada, que compõe aproximadamente 17% de todo o material recolhido.



Figura 3.1: a) Fração retida na peneira de malha de 1,18 mm b) Finos da serragem

Após o peneiramento de todo o material, o mesmo foi homogeneizado pelo método de pilha alongada, conforme ilustrado na Figura 3.2. Assim, toda a serragem foi espalhada, com lançamentos em sentidos opostos. Ao final, o material das extremidades foi retirado e lançado novamente na pilha. Após o procedimento, o material foi embalado em sacos plásticos transparentes e armazenado.



Figura 3.2: Homogeneização do material pelo método de pilha alongada

3.1.1.1 Massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade

A massa específica foi determinada baseando-se na NBR NM 52 (2009). Primeiramente, uma amostra de serragem foi imersa em água por 24 horas. Logo após, ela foi seca ao ar livre, conforme a Figura 3.3, até o ponto em que as partículas estivessem saturadas com a superfície seca.

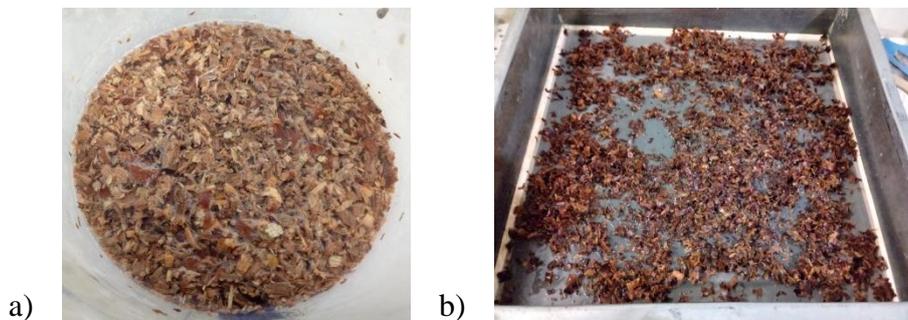


Figura 3.3: a) Serragem submersa em água b) Secagem após 24 horas

A NBR NM 52 (2009) cita que o ponto de saturação com superfície seca é atingido quando, ao se colocar parte da amostra em um molde tronco-cônico e aplicar 25 golpes com haste de compactação, a mesma desmorone ao se retirar o molde. No caso da serragem de madeira o desmoronamento não ocorreu, como ilustrado na Figura 3.4. Bio-agregados secos também foram testados e foi observado o mesmo comportamento. Assim, o ponto desejado para o ensaio foi considerado quando as partículas se apresentaram secas ao toque.

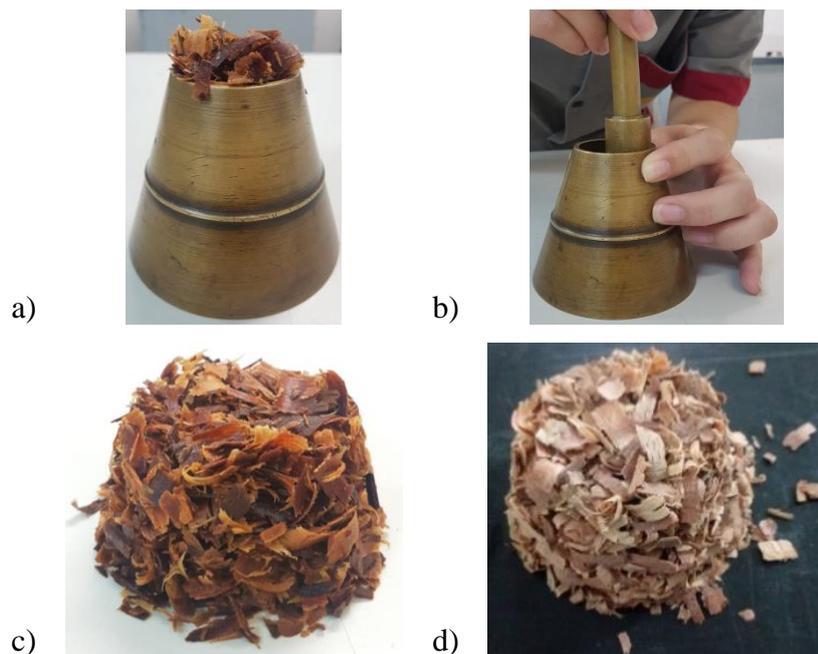


Figura 3.4: a) Preenchimento do molde tronco-cônico b) Aplicação dos golpes com haste c) Bio-agregado saturado superfície seca d) Bio-agregado seco

Em seguida, 50 g de material foram colocadas em um balão de Erlenmeyer de 500 ml e este completado com água, como ilustrado na Figura 3.5. Em momento oportuno e de acordo com a NBR NM 52 (2009), todas as massas necessárias foram registradas e a amostra seca em estufa.



Figura 3.5: Material no Erlenmeyer de 500 ml

A massa específica aparente do agregado seco foi calculada pela Equação 3.1 e a absorção pela Equação 3.2, sendo esta de acordo com a NBR NM 53 (2002).

$$d = \frac{m}{V - V_a} \quad (3.1)$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

d: massa específica aparente do agregado seco (g/cm³)

A: absorção de água (%)

m: massa da amostra seca em estufa (g)

m_s: massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

V: volume do frasco (cm³)

V_a: volume de água adicionada ao frasco (cm³)

O teor de umidade foi calculado pela Equação 3.3, baseado na NBR 9939 (2012). Três amostras de 100 g de serragem de madeira foram colocadas em estufa a 60 °C até constância de massa.

$$U = \frac{(M_i - M_f)}{M_f} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

U: teor de umidade (%)

M_i: massa inicial da amostra (g)

M_f: massa final da amostra (g)

Os valores encontrados para cada variável estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade

d (g/cm³)	A (%)	U (%)
0,60	103,14	11,21

3.1.1.2 Morfologia da serragem de madeira utilizando *Aggregate Imaging System* (AIMS)

O ensaio de morfologia da serragem de madeira foi realizado no equipamento *Aggregate Imaging System* (AIMS), da marca Pine, localizado no Laboratório de Geotecnia Professor Jacques de Medina (Labgeo), da COPPE/UFRJ. O equipamento é composto por um hardware de aquisição de imagens e um software para executar o sistema e analisar os dados. Para agregados graúdos, ele fornece informações sobre forma tridimensional, angularidade, textura, esfericidade, planicidade, alongamento e a relação entre planicidade e alongamento. Já para agregados miúdos, ele fornece dados sobre forma bidimensional e angularidade.

Para o ensaio, o equipamento considera como agregado graúdo as partículas retidas nas peneiras de malha 25; 19; 12,5; 9,5; 6,35 e 4,75 mm e como agregado miúdo aquelas retidas em peneiras de malha 2,36; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15; e 0,075 mm. Para a análise ser considerada completa, é necessária a leitura de 50 partículas de cada agregado graúdo e 150 de cada agregado miúdo.

No caso da serragem de madeira deste trabalho, foram obtidas com o peneiramento partículas retidas nas peneiras de malha 9,5; 6,35; 4,75; 2,36 e 1,18 mm, englobando partículas de agregado miúdo e graúdo. Para cada um desses grupos, as partículas foram posicionadas em uma bandeja, conforme Figura 3.6, o equipamento fechado e a leitura realizada.

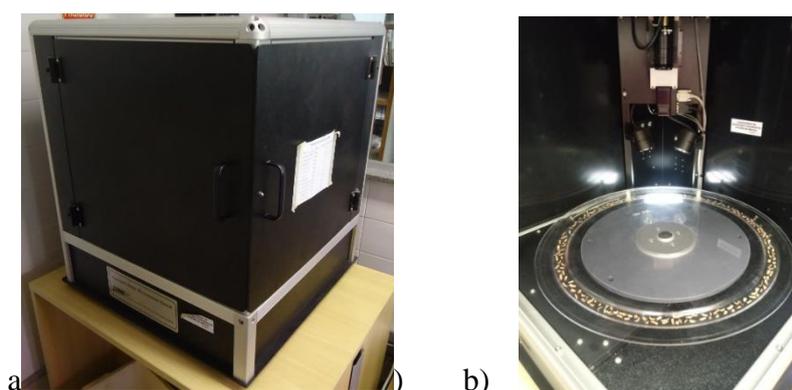


Figura 3.6: a) Equipamento para análise das partículas b) Distribuição das partículas no seu interior

O índice de angularidade está relacionado às variações no contorno da partícula e aplica-se a ambos agregados, graúdo e miúdo, sendo por isso o único apresentado neste trabalho. Ele varia de 0 a 10000, sendo valores próximos a zero característicos de

partículas com forma similar a um círculo perfeito (DA SILVA, 2015). Os limites para classificação das partículas utilizados neste trabalho foram definidos por AL ROUSAN (2004), citados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Índices de angularidade e limites de classificação (AL ROUSAN, 2004)

Angularidade	Classificação
< 2100	Arredondado
2100 - 4000	Sub-arredondado
4000 - 5400	Sub-angular
\geq 5400	Angular

A Figura 3.7 ilustra cada fração de serragem inserida no equipamento para leitura (coluna a) e imagens obtidas por ele (coluna b). As curvas de distribuições cumulativas para o índice de angularidade podem ser observadas na Figura 3.8.

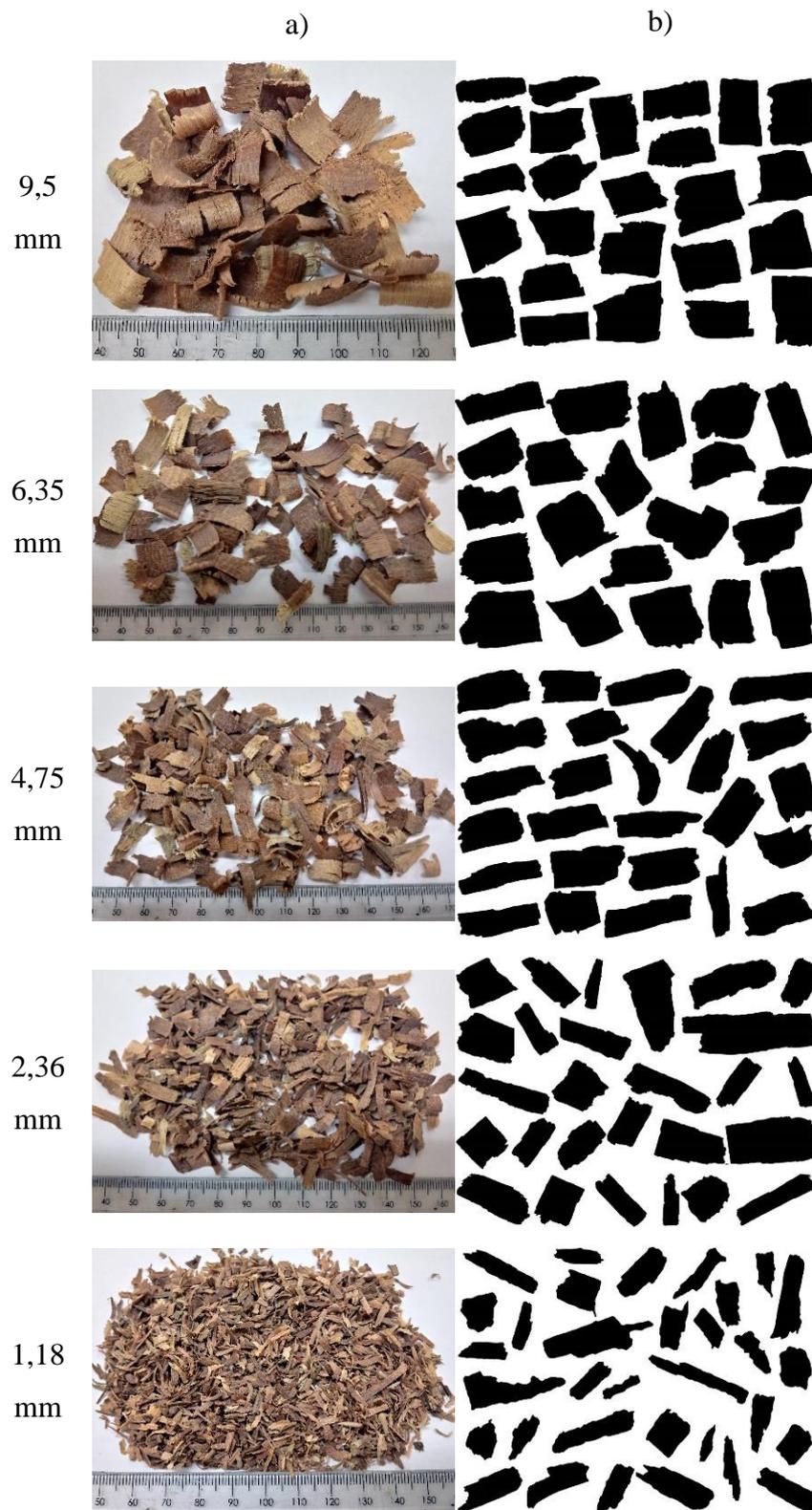


Figura 3.7: a) Partículas analisadas b) Imagens fornecidas pelo equipamento

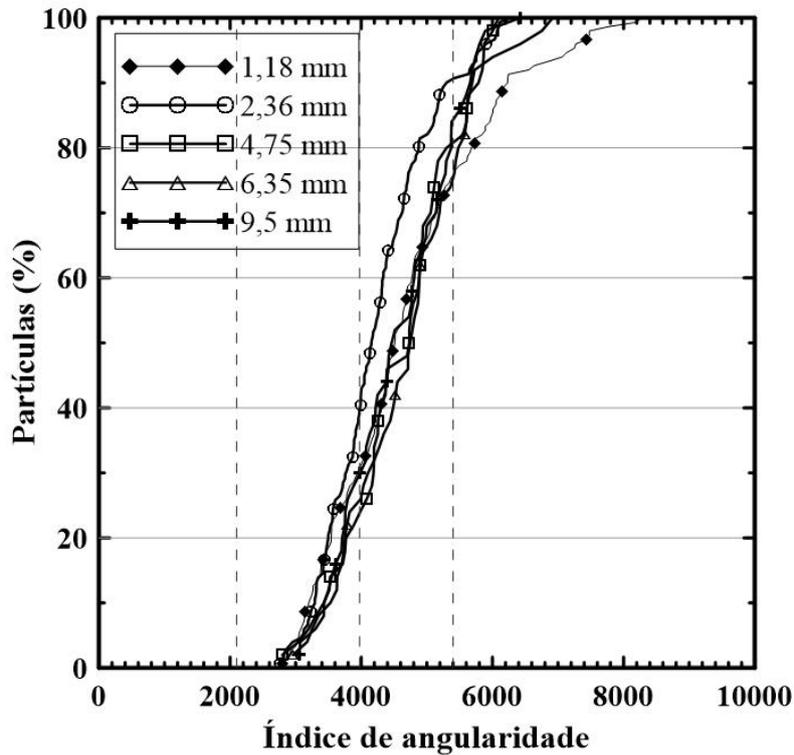


Figura 3.8: Índice de angularidade da serragem de madeira

O índice de angularidade médio encontrado foi 4521,2, com valores variando entre 2763,1 e 8269,4. De acordo com AL ROUSAN (2004), todas as frações analisadas podem ser classificadas como sub-angulares. O coeficiente de variação encontrado para este ensaio foi elevado (22 %), indicando grande heterogeneidade da amostra.

3.1.1.3 Composição química

A composição química da serragem de madeira foi obtida de acordo com métodos de análise definidos por Abreu *et al.* (2006) e foi realizada no Laboratório CoppeComb da Coppe/UFRJ. Foram quantificados os teores de extrativos, lignina, hemicelulose e celulose.

3.1.1.3.1 Extrativos

Primeiramente, a serragem de madeira foi moída em moinho de facas e depois peneirada em peneirador mecânico para a obtenção de material passante na peneira de malha 40 ASTM e retido na peneira de malha 60 ASTM. Logo após, três cartuchos foram preparados com papel filtro com 20 g de material cada, com tamanho suficiente para o seu devido posicionamento dentro de um extrator.

A extração foi realizada em três etapas, sendo utilizados como solventes ciclohexano, acetato de etila e metanol. O sistema de extração está ilustrado na Figura 3.9. Para a primeira etapa, 400 ml de ciclohexano foram colocados no balão volumétrico e este último posicionado sobre a chapa de aquecimento. O sistema de extração ficou ligado por 12 horas.



Figura 3.9: Extrator de Soxhlet

Logo após, o solvente foi filtrado, colocado em banho-maria a 70 °C acoplado a um rotavapor (Figura 3.10.a), até sua evaporação quase total. A seguir, colocou-se o restante do líquido em um frasco, conforme Figura 3.10.b, e este deixado em uma capela até total evaporação. As outras duas etapas seguiram os mesmos procedimentos (Figura 3.10.c e Figura 3.10.d) utilizando-se os solventes acetato de etila e metanol.

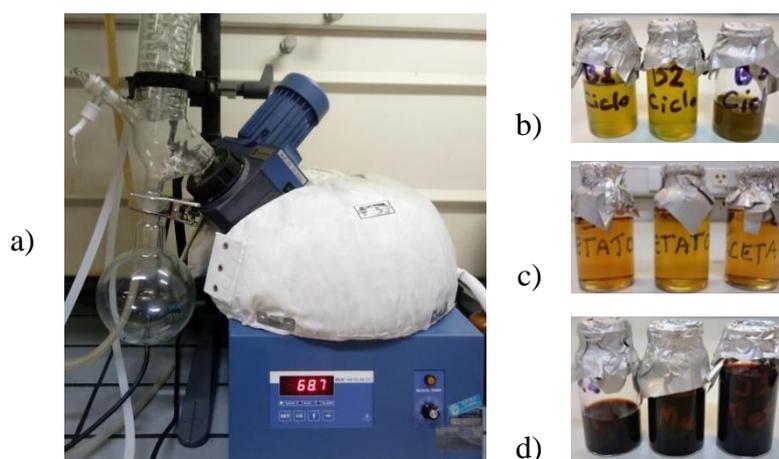


Figura 3.10: a) Banho-maria com rotavapor b) Frascos com ciclohexano c) Frascos com acetato de etila d) Frascos com metanol

A porcentagem de extrativos foi calculada pela Equação 3.4.

$$\%_{extrativos} = \frac{M_i - M_s}{M_i} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

M_i : massa inicial da amostra (g)

M_s : massa seca do resíduo (g)

3.1.1.3.2 Lignina

Em um tubo de ensaio foi colocado 0,3 g de amostra seca e livre de extrativos e 3 mL de ácido sulfúrico (72%). A mistura foi homogeneizada por um minuto e colocada em banho-maria a 27 °C por 60 min (Figura 3.11.a). Logo após, o material foi transferido para um balão, diluído em 84 mL de água destilada e deixado em refluxo por quatro horas (Figura 3.11.b). Ao final, o resíduo foi lavado com água destilada e seco em estufa a 105 °C até constância de massa.

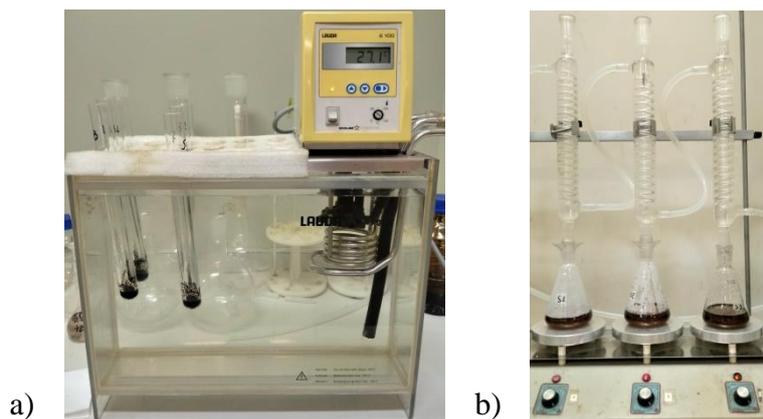


Figura 3.11: a) Amostras em banho-maria b) Amostras em refluxo

A porcentagem de lignina foi determinada pela Equação 3.5.

$$\%_{lignina} = \frac{M_i - M_s}{M_i} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

M_i : massa inicial da amostra (g)

M_s : massa seca do resíduo (g)

3.1.1.3.3 Holocelulose

Este procedimento foi uma etapa prévia para, logo após, ser possível a determinação dos teores de hemicelulose e celulose.

Em um Erlenmeyer foram adicionados 2,5 g de amostra livre de extrativos, 80 mL de água destilada quente, 0,5 mL de ácido acético e 1 g de clorito de sódio (Figura 3.12) e essa mistura foi aquecida em um banho-maria a 70 °C. Após sucessivas horas, 0,5 mL de ácido acético e 1 g de clorito de sódio foram incorporados à mistura, sob agitação. Essa etapa foi repetida até se completar seis horas de cloração. Ao final, a amostra foi mantida em repouso por 24 horas.



Figura 3.12: Serragem livre de extrativos adicionada de solventes para determinação da holocelulose

Após o repouso, o material foi resfriado e filtrado a vácuo. Em seguida, ele foi lavado com água destilada até que a cor amarela e o odor de cloro desaparecessem totalmente. O resíduo foi seco em estufa a 70 °C durante 24 horas.

3.1.1.3.4 Celulose

Esta etapa foi dividida em duas fases. Na primeira, foram adicionados em um béquer 2 g de holocelulose seca e 10 mL da solução de NaOH 17,5% e a mistura levada a banho-maria a 20 °C. Após dois minutos, a holocelulose foi macerada até que as partículas estivessem visivelmente separadas. Com cinco minutos, mais 5 mL de NaOH 17,5% foram adicionados e a mistura agitada rigorosamente com um bastão de vidro até a total dissolução do material. Essa mistura foi mantida a 20 °C por 30 minutos. Em seguida, foram colocados 33 mL de água destilada, o material foi agitado e mantido por mais uma hora em banho-maria.

Na segunda fase, o material obtido na etapa anterior foi filtrado em um filtro de porosidade média. Logo após, este material foi lavado uma vez com 100 mL de NaOH 8,3% a 20 °C e duas vezes com água destilada à mesma temperatura. Em seguida, 15 mL de ácido acético 10% foram adicionados e 3 minutos depois foram retirados com vácuo. Por fim, o resíduo foi lavado com água destilada a 20 °C por várias vezes até ficar completamente livre do ácido acético. O material foi seco em uma estufa a 105 °C durante 24 horas.

Por fim, a quantidade de hemicelulose foi obtida pela diferença entre a holocelulose e a celulose.

3.1.1.3.5 Resultado da composição química

A Tabela 3.3 apresenta o resultado da composição química da serragem de madeira realizada nesta pesquisa. O teor de extrativos foi de 5,9 %, valor dentro da faixa reportada por Klock & Andrade (2013), Pereira *et al.* (2003) e pelo *Forest Products Laboratory* (2010). O teor de lignina foi 32,5 %, dentro da faixa reportada por Mazzanti (2015), Rowell *et al.* (2005), Thomas (2004) e Pereira *et al.* (2003). Os teores de celulose (38,8 %) e hemicelulose (22,8 %) encontrados com essa metodologia ficaram levemente abaixo dos dados citados na Tabela 2.1. Pereira *et al.* (2003) recomendam que comparações sejam feitas com cautela, pois vários fatores podem afetar a composição química da madeira, como sua origem geográfica, gênero e espécie. Até mesmos as diferenças nos procedimentos podem afetar os valores obtidos.

Tabela 3.3: Resultado da composição química

Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos
(%)	(%)	(%)	(%)
38,8	22,8	32,5	5,9

3.1.2 Cimento Portland, metacaulinita e cinza volante

Foram utilizados nessa pesquisa Cimento Portland CP V - ARI, produzido pela empresa Holcim, cinza volante fornecida pela Pozofly e metacaulinita pela Metacaulim do Brasil.

Os ensaios de caracterização destes três materiais foram realizados no Microlab do LABEST/PEC/COPPE/UFRJ. A composição química e massa específica (Tabela 3.4) de cada um deles foram determinadas por Fluorescência de Raios X (FRX) em um equipamento de modelo EDX-720 da Shimadzu e no picnômetro a gás hélio AccuPyc 1340 da Micrometrics, respectivamente.

Tabela 3.4: Composição química e densidade dos materiais cimentícios

Elementos químicos	Cimento	Metacaulinita	Cinza volante
CaO	71,957 %	-	2,267 %
SiO ₂	13,100 %	41,455 %	50,461 %
Al ₂ O ₃	4,858 %	48,137 %	33,857 %
Fe ₂ O ₃	3,840 %	5,837 %	5,280 %
SO ₃	3,324 %	1,247 %	1,577 %
K ₂ O	1,065 %	0,583 %	3,486 %
SrO	0,479 %	-	0,024 %
TiO ₂	0,295 %	1,011 %	1,228 %
MnO	0,145 %	0,113 %	0,045 %
BaO	-	0,398 %	0,588 %
ZrO ₂	-	0,192 %	0,110 %
NbO	-	0,038 %	0,006 %
ZnO	-	0,016 %	0,045 %
Ga ₂ O ₃	-	0,009 %	-
Rb ₂ O	-	-	0,028 %
Y ₂ O ₃	-	-	0,012 %
PF*	0,937 %	0,964 %	0,986 %
Densidade	3,09 g/cm³	2,51 g/cm³	1,89 g/cm³

*Perda ao fogo

As curvas granulométricas (Figura 3.13) foram obtidas por meio do equipamento a laser Malvern MasterSize 2000, que consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados aos diâmetros das partículas.

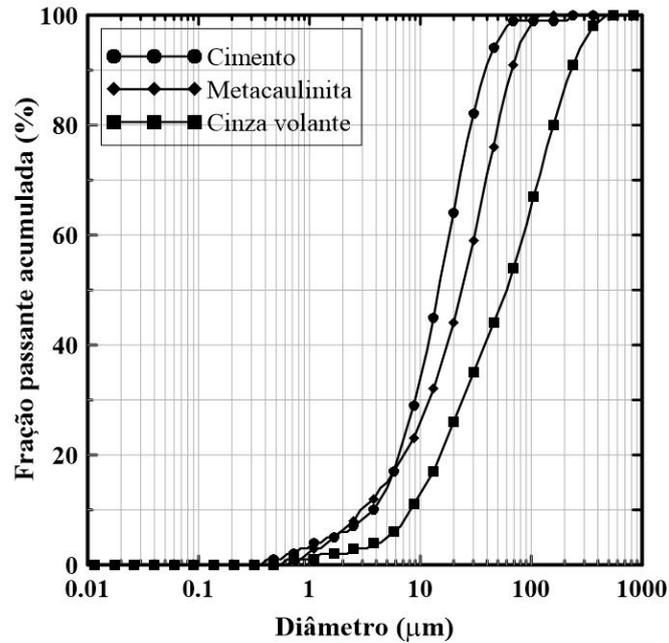


Figura 3.13: Curvas granulométricas dos materiais cimentícios

3.1.3 Água

A água utilizada nesta pesquisa foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro/RJ.

3.1.4 Aditivos químicos

O cloreto de cálcio puríssimo anidro e o hidróxido de cálcio foram utilizados em conjunto com a água na fase de pré-tratamento da serragem.

O superplastificante Glenium 51 e o agente modificador de viscosidade (VMA) MasterMatrix UW 410, ambos fabricados pela empresa BASF foram utilizados na fabricação do bioconcreto para o ensaio de pulso ultrassônico. O uso de Glenium 51 foi necessário para aumentar a trabalhabilidade do bioconcreto e o VMA para garantir a coesão e evitar a exsudação e a segregação do bioconcreto.

3.2 Pré-tratamento da serragem de madeira

Na primeira etapa deste trabalho partículas de serragem de madeira foram imersas em água (Figura 3.14), nas temperaturas e tempos de imersão descritos na Tabela 3.5 e com a razão massa de serragem/volume de água (m_s/m_a) igual a 1/10. Essa razão foi

escolhida como primeira tentativa por ter sido utilizada nos trabalhos de Pimentel (2000), Soroushian & Hassan (2012), Da Gloria (2015) e Andreola (2017). As temperaturas e tempos de imersão foram definidos após a revisão da literatura.

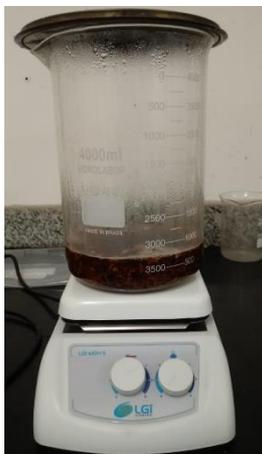


Figura 3.14: Conjunto para imersão das partículas de madeira

Tabela 3.5: Temperaturas e tempos de imersão

Temperatura (°C)	Tempos de imersão (h)		
25	2	24	48
60	0,5	1	2
80	0,5	1	2
85	0,5	-	-
90	0,5	-	-
95	0,5	-	-

A partir dos resultados dos ensaios de tempo de pega, a temperatura e o tempo de imersão foram fixados e a relação m_s/m_a foi avaliada. A quantidade de água para a lavagem das partículas de madeira foi reduzida, utilizando os valores de m_s/m_a iguais a 1/5 e 1/4. A serragem foi agitada com uma espátula a cada 5 minutos.

A partir dos resultados dos ensaios de tempo de pega escolheu-se uma relação m_s/m_a para testar a lavagem da serragem de madeira em solução saturada de hidróxido de cálcio (0,73 % em volume de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) e em solução com 4 % de cloreto de cálcio (CaCl_2). A solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi escolhida com base em estudos de fibras, onde ela é utilizada para melhorar a adesão entre fira e matriz (FERREIRA, 2016) e

também nos estudos de bioconcreto de Iwakiri *et al.* (2015) e Quiroga *et al.* (2016). A solução de CaCl_2 foi usada para testar a possível eficiência deste composto na retirada de parte dos extrativos e para avaliar se a filtragem da água de lavagem em um sistema de membranas permitia a passagem do CaCl_2 para o seu uso como acelerador na fabricação do bioconcreto.

Como o bambu também vem sendo alvo de pesquisas para o seu uso em forma de partículas como bioagregado em bioconcretos no mesmo laboratório que essa dissertação foi desenvolvida, optou-se por testar a sua lavagem em água a 80 °C por 30 minutos, utilizando a maior razão m_s/m_a possível, que neste caso foi 1/2,5. Essa razão só foi possível porque as partículas de bambu em questão absorvem menos água que a serragem de madeira. As soluções saturadas de Ca(OH)_2 e com 4 % de CaCl_2 também foram testadas, porém considerando m_s/m_a igual a 1/2,5.

3.3 Tempo de pega

3.3.1 Matriz cimentícia

Nesta pesquisa foi utilizada uma matriz cimentícia composta por 60 % de cimento, 30 % de metacaulinita e 10 % de cinza volante. Essa composição foi definida por pesquisadores do NUMATS/POLI/COPPE/UFRJ com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e melhorar a resistência mecânica dos bioconcretos. Estudos similares também com bioconcreto foram realizados por Lima *et al.* (2010) e Lima *et al.* (2011), provando a viabilidade da substituição de parte do cimento por materiais pozolânicos.

3.3.2 Agulha de Vicat

Para cada uma das situações citadas anteriormente foram separadas porções da água residual para fabricação de pastas e determinação dos tempos de início e fim de pega através do aparelho de Vicat. Como materiais cimentícios foram utilizados cimento, metacaulinita e cinza volante nas porcentagens de 60 %, 30 % e 10 %, respectivamente.

Para cada mistura, água deionizada (referência) e água residual foram pesadas diretamente na cuba do misturador de 5 litros, respeitando a razão água/cimento de 0,40, conforme utilizado por Da Gloria (2015) e Andreola (2017). Logo após, os materiais cimentícios previamente homogeneizados foram adicionados. Todo o procedimento de

fabricação da pasta durou cerca de 2:20 minutos. Ao final, a pasta foi colocada em um molde tronco-cônico (altura = 40 mm, diâmetro₁ = 80 mm e diâmetro₂ = 70 mm).

O monitoramento da pega foi feito pelo aparelho de Vicat (Figura 3.15), através de adaptações da NBR NM 65. Neste trabalho optou-se por não utilizar a pasta de consistência normal. No lugar desta, fixou-se a relação água/materiais cimentícios em 0,4, sendo esta utilizada na fabricação de bioconcreto (DA GLORIA, 2015; ANDREOLA, 2017). Esse equipamento consiste em uma agulha de 1,13 mm de diâmetro fixada a uma haste móvel com 300 g. O início da pega é definido como o tempo decorrido entre o contato da água com o cimento até o momento em que a agulha penetra a pasta 4±1 mm distante da base do molde. O fim da pega é considerado o tempo do contato da água com o cimento até o momento que a agulha penetra somente 0,5 mm na pasta.

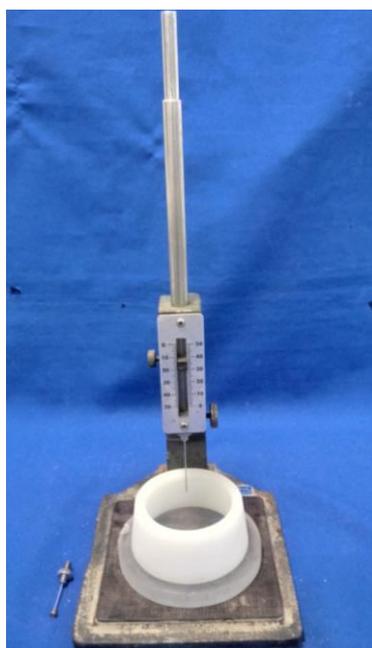


Figura 3.15: Aparelho de Vicat utilizado para monitorar a pega

3.4 Sistema de membranas

Os processos de separação por membranas utilizados neste trabalho visaram a remoção dos extrativos da água residual oriunda dos pré-tratamentos da serragem de madeira. No caso das águas residuais dos pré-tratamentos com hidróxido de cálcio e cloreto de cálcio, além da remoção dos extrativos, tinha-se o objetivo de que estes produtos químicos permeassem a membrana. Utilizou-se dois processos: osmose inversa (OI) e

nanofiltração (NF). Para ambos, o sistema de membranas ilustrado na Figura 3.16 foi utilizado.

O sistema contava com: (a) cilindro de gás nitrogênio pressurizado, (b) dois manômetros (saída do cilindro de gás e na célula de separação), (c) célula de separação, (d) canal de entrada da amostra, (e) canal de saída do concentrado, (f) canal de saída do permeado, (g) válvula de escape de ar, (h) agitador magnético – IKA® CG-MAG MS7 e (i) balança analítica – Gehaka BK 3000 (Figura 3.16).

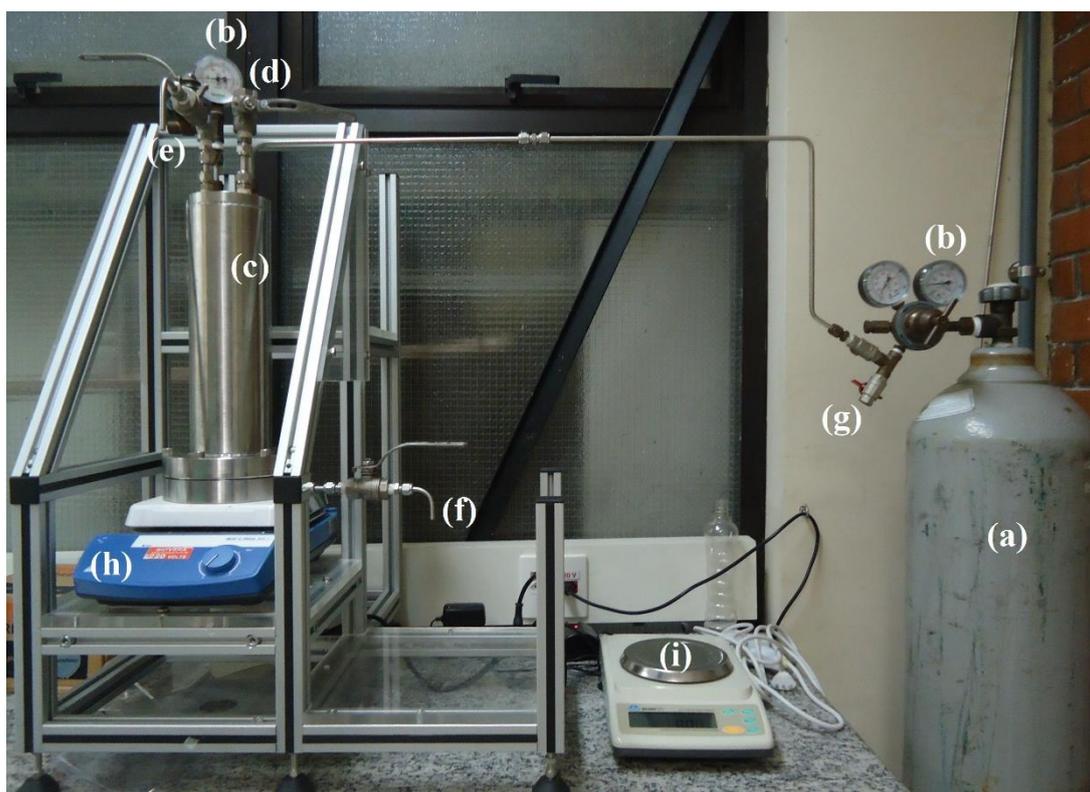


Figura 3.16: Sistema utilizado para os Processos de Separação por Membrana

Dentro da célula de separação foi posicionada uma barra magnética, para prover turbulência e mistura do concentrado, diminuindo assim problemas de incrustações; um espaçador de aço-inox na parte inferior, porém sem contato direto com a membrana; e suporte da membrana em meio poroso de aço-inox.

3.4.1 Osmose inversa

Para a osmose inversa foi utilizada a membrana SW30-2540 da Filmtec (Figura 3.17). Foram filtradas 4 amostras nessa fase, sendo elas de razões biomassa/água 1/10, 1/5 e

1/4 para a serragem de madeira e 1/2,5 para as partículas de bambu, considerando a recuperação de 70 % à pressão de 30 bar.



Figura 3.17: Membrana SW30-2540 para osmose inversa

3.4.2 Nanofiltração

Para a nanofiltração foi utilizada a membrana NP010 P Nadir (Figura 3.18). Foram filtradas duas amostras oriundas de tratamentos na serragem de madeira (uma com hidróxido de cálcio e uma com cloreto de cálcio) e duas amostras oriundas de tratamentos nas partículas de bambu, considerando a recuperação de 70 % à pressão de 20 bar.



Figura 3.18: Membrana NP010 P para nanofiltração

3.4.3 Caracterização das águas residuais e dos permeados

Foram realizados ensaios nas águas residuais e nos permeados para verificar a eficiência dos processos de separação por membranas no tratamento das águas residuais. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Águas e Reuso de Efluentes (LabTare) da Escola de Química da UFRJ.

3.4.3.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH representa a concentração de íons de hidrogênio H^+ (em escala antilogarítmica). Sua faixa varia de 0 a 14, dando uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. Efluentes com pH baixo tem potencial de corrosividade e agressividade em tubulações e efluentes com pH alto tem a possibilidade de criar incrustações em tubulações (VON SPERLING, 2014). A faixa de pH para a existência da maioria dos seres vivos é pequena (normalmente 6 a 9), por isso o pH aceitável para efluentes tratados serem descartados no meio ambiente normalmente varia entre 6,5 e 8,5 (METCALF & EDDY, 2014).

O pH das amostras de água residual e permeado foi determinado por meio de pHmetro da Sanxin modelo PHS-3D, ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19: pHmetro

3.4.3.2 Condutividade iônica

Condutividade iônica é a medida da capacidade de uma solução aquosa transportar uma corrente elétrica. Ela depende da presença de íons e da sua concentração. Moléculas de compostos orgânicos que não se dissociam em solução aquosa normalmente não são bons condutores. Em contrapartida, soluções da maioria dos compostos inorgânicos são excelentes condutores (APHA, 1999).

O ensaio foi realizado em um Condutivímetro mCA 150 da marca MS Tecnoyon Instrumentação (Figura 3.20).



Figura 3.20: Condutivímetro

3.4.3.3 Absorvância de luz UV em 254 nm

O ensaio de absorvância de luz UV em 254 nm permite uma avaliação indireta do teor de anéis aromáticos. Este ensaio tem por base a capacidade destes anéis aromáticos de absorver luz UV (ANDRADE JR. 2004).

Este ensaio foi realizado em espectrofotômetro da Shimadzu, modelo UV-1800 ilustrado na Figura 3.21.



Figura 3.21: Espectrofotômetro modelo UV-1800

3.4.3.4 Cromatografia iônica

A cromatografia de íons é uma técnica utilizada para a detecção de íons, mesmo em baixas concentrações. Este ensaio foi realizado para detectar íons cálcio e cloreto nos permeados, como forma de verificar se a membrana de nanofiltração permitiu a passagem destes da água residual para o permeado, como era esperado.

Para este trabalho, foi utilizado um equipamento da marca Metrohm, modelo 930 Compact IC Flex (Figura 3.22).



Figura 3.22: Cromatógrafo iônico

3.4.4 Hidratação da matriz cimentícia por calorimetria isotérmica

Os ensaios de calorimetria isotérmica foram realizados em um calorímetro *TAM Air* (*TA Instruments*), com 8 canais independentes e precisão de $20 \mu\text{W}$, do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ. Cada canal possui uma configuração gêmea, onde o lado A é destinado à ampola contendo a amostra e o lado B destinado à ampola referência (SIQUEIRA, 2014). A aquisição do fluxo de calor, tanto para a amostra como para a referência, é dada através de sensores que estão em contato com o fundo das ampolas. O gradiente de temperatura no sensor gera uma diferença de potencial (voltagem) proporcional ao fluxo de calor e esse diferencial é medido pelo sensor. O gráfico obtido é igual ao fluxo de calor do lado A subtraído do obtido no lado B.

Para avaliar a influência da água tratada na hidratação da matriz, foram produzidas pastas com cimento (60 %), metacaulinita (30 %), cinza volante (10 %) e as diferentes águas descritas na Tabela 3.6, usando uma relação água materiais cimentícios de 0,55. Esta relação água materiais cimentícios foi determinada através de tentativas e foi necessária para que a pasta tivesse uma consistência adequada para a sua inserção nas ampolas e posterior realização do ensaio.

Tabela 3.6: Nomenclatura utilizada para o ensaio de calorimetria isotérmica

Pastas	Águas utilizadas
A_{deio}	Água deionizada
A_{osmo}	Permeado 1/4 da osmose inversa
A_{nCH}	Permeado da nanofiltração com $Ca(OH)_2$
A_{nCl}	Permeado da nanofiltração com $CaCl_2$
A_{ser}	Água residual 1/4
A_{bambu}	Água residual 1/2,5

Para a obtenção de cada amostra, uma mistura de 20 ml de pasta foi realizada em um béquer, com o auxílio de um bastão. Primeiro, os materiais cimentícios foram pesados em um saco pequeno e em seguida homogeneizados. Depois, pesou-se a água diretamente em um béquer, os materiais homogeneizados foram adicionados e procedeu-se à sua mistura por cerca de 90 segundos. Em seguida, adicionou-se em uma ampola cerca de 5 g desta pasta com o auxílio de uma seringa. Por fim, a ampola foi fechada e colocada no canal A do calorímetro. Todo o procedimento foi realizado em cerca de 8 minutos. A duração mínima dos ensaios foi de 166 h (aproximadamente 7 dias) e a temperatura de 25 °C.

Uma curva típica de evolução de calor obtida por testes de calorimetria isotérmica é apresentada na Figura 3.23. O período I (pré-indução) possui um pico exotérmico intenso causado pela completa dissolução dos sulfatos alcalinos, pela dissolução do sulfato de cálcio até a saturação, pelo início da dissolução das fases C_3S e C_3A e pela rápida formação da etringita. O período II (dormência) é caracterizado por uma taxa de hidratação mínima. O período III (aceleração) apresenta forte decréscimo da quantidade de C_3S e rápida formação de CH e C-S-H. O período IV (desaceleração) é caracterizado pela predominância da difusão (BULLARD *et al.*, 2011).

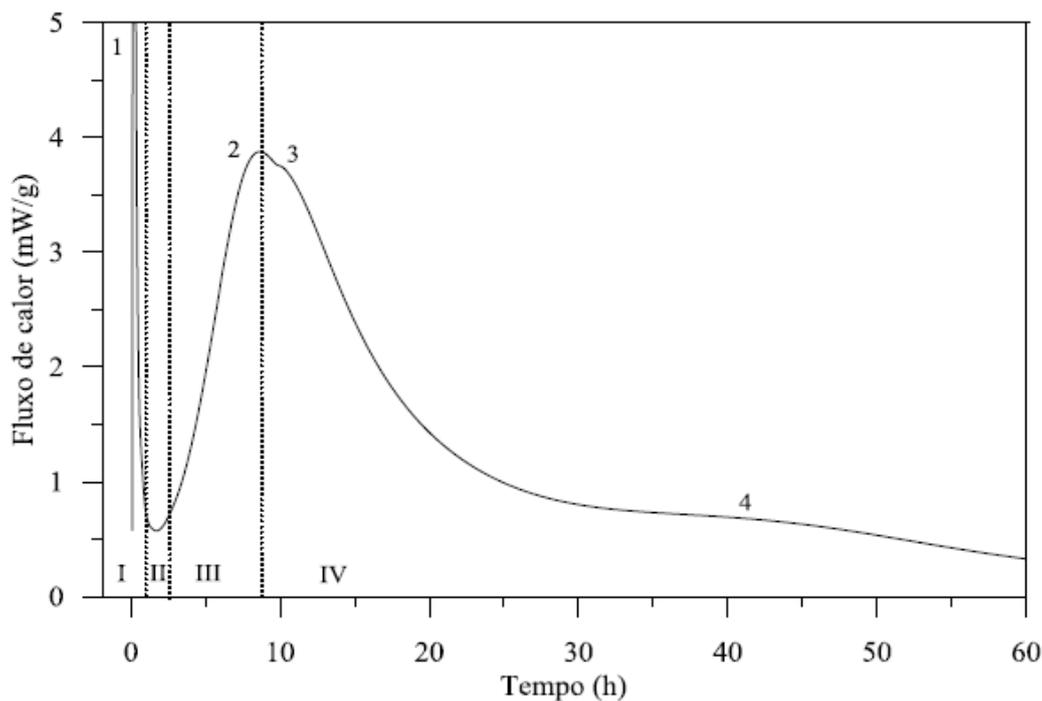


Figura 3.23: Fluxo total de calor durante a hidratação de uma pasta de cimento (ROCHA, 2015)

3.5 Produção do bioconcreto

3.5.1 Compensação de água

Wolfe & Gjinolli (1999) citam que a quantidade de água no bioconcreto deve ser suficiente para propiciar a hidratação do cimento, proporcionar consistência à mistura e manter a serragem de madeira saturada. Devido à grande incidência de poros permeáveis, materiais vegetais apresentam grande absorção de água, sendo geralmente acima de 90 % (SOUZA, 2006).

Para a definição da quantidade de água de absorção a ser inserida no bioconcreto utilizado nesta pesquisa, 200 g de serragem de madeira e 800 g de água foram adicionados a uma argamassadeira e misturados por 8 minutos, sendo o mesmo tempo utilizado para a produção do bioconcreto por Da Gloria (2015) e Andreola (2017) e adotado nessa pesquisa. Logo após, o material foi colocado em peneira para a retirada do excesso de água. Depois de 15 minutos a massa foi registrada. Assim, chegou-se ao valor de 100 % de absorção de água pela serragem de madeira.

3.6 Hidratação do bioconcreto

Com o objetivo de analisar a interferência da serragem de madeira após cada tratamento na hidratação do bioconcreto, foram realizados ensaios de cinética de hidratação pela velocidade de propagação do pulso ultrassônico e elevação adiabática de temperatura nos bioconcretos descritos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Nomenclatura utilizada para os ensaios de hidratação do bioconcreto

Bioconcretos	Tratamentos aplicados às partículas
1/10	Razão biomassa/água = 1/10
1/4	Razão biomassa/água = 1/4
1/4-Ca(OH) ₂	Razão biomassa/água = 1/4 e Ca(OH) ₂
1/4-CaCl ₂	Razão biomassa/água = 1/4 e CaCl ₂

3.6.1 Cinética de hidratação pela velocidade do pulso ultrassônico

O método de medição do pulso ultrassônico foi realizado para a determinação da cinética de hidratação do bioconcreto e do seu patamar de percolação. Utilizou-se o equipamento *Ultrasonic Cement Analyzer* (UCA), modelo 4262 *Twin Cell* da marca *Chandler Engineering*, do Laboratório de Estruturas e Materiais (LabEst) da COPPE/UFRJ (Figura 3.24). Os ensaios foram realizados a 25 °C e pressão de 54 atm, durante aproximadamente 7 dias.



Figura 3.24: Equipamento e computador para aquisição de dados para o ensaio de pulso ultrassônico

A velocidade de propagação do pulso ultrassônico depende de diversos fatores, dentre eles a conectividade do material. Assim, ela sofre mudanças durante a hidratação do cimento. No estado de suspensão, a fase líquida é a fase dominante, sendo este o meio de propagação do pulso. O patamar de percolação (P_p) é o momento no qual a suspensão viscosa deixa de ser dominante para que um meio sólido constituído pelas estruturas formadas nas reações de hidratação seja a fase contínua do material (VITORINO, 2012).

Para este ensaio foram preparados bioconcretos considerando o volume de biomassa de 40 %, relação água/materiais cimentícios igual a 0,40 (DA GLORIA, 2015; ANDREOLA, 2017) e água de absorção igual a 100 %. Como forma de melhorar a trabalhabilidade da mistura, 0,3 % de superplastificante (porcentagem do teor de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios) foram adicionados à mistura. 0,075 % de VMA foram adicionados para impedir a segregação do bioconcreto. Este bioconcreto teve um consumo de materiais conforme a Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Consumo em materiais do bioconcreto

Bioconcretos	kg/m³
Cimento	439,02
Metacaulinita	219,51
Cinza volante	73,17
Serragem	240,00
Água de hidratação	292,68
Água de absorção	240,00
Superplastificante	4,32
VMA	0,55

3.6.2 Elevação adiabática de temperatura

O ensaio de elevação adiabática de temperatura teve como objetivo estudar a evolução da hidratação por meio da elevação de temperatura dos bioconcretos submetidos a um sistema adiabático, ou seja, um sistema onde não há trocas de calor entre o corpo-de-prova e o ambiente. Desta forma, a elevação de temperatura é devida somente às reações exotérmicas de hidratação.

Os ensaios foram realizados utilizando os calorímetros adiabáticos ilustrados na Figura 3.25. Na medida que a temperatura do corpo-de-prova aumenta devido às reações de hidratação, o sistema eletrônico de controle de temperatura do calorímetro ativa a resistência elétrica. Desta maneira, a temperatura do banho sempre acompanha a temperatura do corpo de prova, com precisão de 0,1 °C. A homogeneidade da temperatura do banho é garantida por agitadores do próprio equipamento.



Figura 3.25: Calorímetros adiabáticos

Seguindo os procedimentos utilizados por Siqueira (2014), o ensaio se iniciou com uma temperatura de banho de $15 \pm 1,0$ °C. e todos os materiais foram pesados, lacrados e colocados em uma sala climatizada à 4 ± 2 °C um dia antes do início do ensaio. Os bioconcretos foram moldados considerando o volume de serragem (V) igual a 45 %. A relação água/materiais cimentícios (a/c) foi de 0,40 e a água de absorção considerada foi 100 %. Após a produção do bioconcreto, 1400 g de material foram colocadas na célula do equipamento e o ensaio iniciado. Este bioconcreto teve um consumo de materiais conforme a Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Consumo em materiais do bioconcreto

Bioconcretos	kg/m³
Cimento	402,43
Metacaulinita	201,22
Cinza volante	67,07
Serragem	270,00
Água de hidratação	268,29
Água de absorção	270,00

3.6.3 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia foi utilizada para analisar a superfície das partículas de serragem de madeira tratadas e a interface entre a serragem de madeira e a matriz cimentícia. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) TM 3000, do Laboratório de Técnicas Analíticas do Labest/COPPE/UFRJ. Amostras da serragem e do bioconcreto fraturado foram aderidas ao porta-amostra por meio de um adesivo condutor de carbono. Não foi necessário recobrimento para a realização do ensaio.

3.7 Análise do ciclo de vida

A ACV foi dividida em quatro fases: definição do projeto e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação do ciclo de vida, conforme sugerido pelas normas da série ISO, traduzida nas normas brasileiras NBR ISO 14040 (2009) e NBR ISO 14044 (2009).

3.7.1 Definição do objetivo e escopo do estudo

O objetivo deste estudo foi a avaliação de indicadores de eficiência relacionando o consumo de água e mudanças climáticas com o ganho de calor retirado da curva de calorimetria isotérmica das pastas. Neste caso, quanto maior o ganho de calor durante a hidratação, melhor seria a hidratação do bioconcreto, melhorando os resultados de ACV. Os resultados foram normalizados com dados retirados da calorimetria isotérmica das pastas no tempo de 3 horas. Uma segunda alternativa seria a normalização pela inclinação retirada das curvas de aceleração de pulso ultrassônico. Da mesma forma, quanto maior a inclinação, melhor os resultados. Os bioconcretos analisados foram

aqueles fabricados com serragem de madeira com cada um dos seguintes tratamentos: 1/10, 1/4, 1/4-Ca(OH)₂ e 1/4-CaCl₂. O escopo escolhido foi do tipo berço ao portão, conforme ilustrado na Figura 3.26, considerando o transporte da matéria-prima e a produção do bioconcreto no laboratório e a unidade funcional foi o volume produzido (em m³). Assim, as emissões de CO₂ para a produção de 1 m³ de bioconcreto de serragem de madeira para cada um dos pré-tratamentos da serragem foram quantificadas.

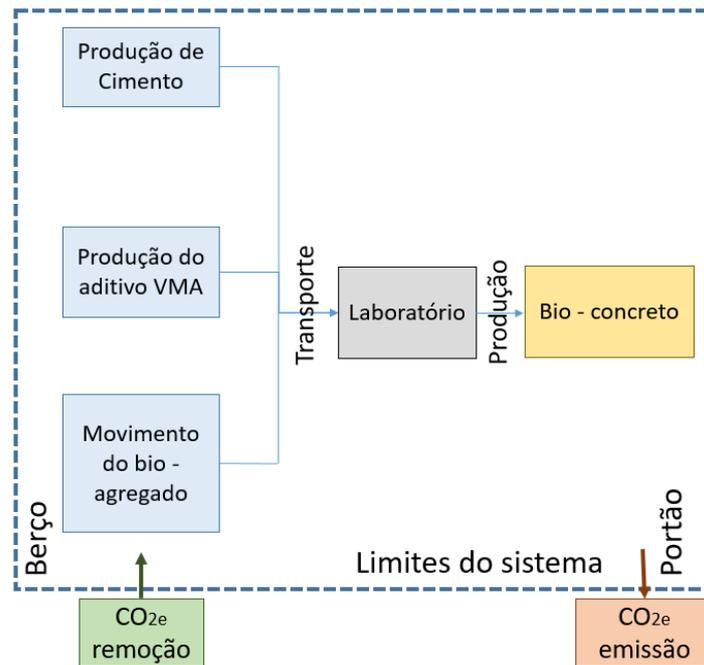


Figura 3.26: Limites do sistema de produção (CALDAS *et al.*, 2017)

3.7.2 Análise do inventário

Os dados de inventário de CO_{2-eq} dos materiais cimentícios (cimento, metacaulinita e cinza volante) e dos aditivos (Ca(OH)₂ e CaCl₂) foram retirados do banco de dados do *Ecoinvent* (versão 3.3) com adaptações para o contexto brasileiro. Como a serragem de madeira é um resíduo, foi considerado o tratamento realizado no laboratório com lavagem a 80 °C e peneiramento, contabilizando o consumo de água e energia elétrica durante esses processos. Os dados da água foram obtidos através do método Aware e os dados referentes ao sistema de membranas foram retirados do Painel de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006).

4 Resultados e discussões

4.1 Águas residuais dos diferentes tratamentos da serragem

As águas residuais obtidas neste trabalho após a imersão da serragem de madeira em água em diferentes condições estão apresentadas na Figura 4.1. Estas também são as águas que foram utilizadas na fabricação de pastas para o ensaio de determinação do tempo de pega. Para a temperatura de 25 °C pode-se observar uma diferença de coloração entre as três amostras devido à quantidade de extrativos solubilizados com o tempo. Quanto mais escura a amostra, maior é a quantidade de extrativos que ela possui. O mesmo ocorreu na temperatura de 60 °C, porém a diferença de cor entre os exemplares é menor. Em 80 °C, as três amostras possuem a mesma cor, o que leva a concluir que um tempo de residência maior que 0,5 horas aparentemente não solubiliza uma maior quantidade de extrativos. Ao se observar as águas residuais obtidas nas temperaturas de 80 °C, 85 °C, 90 °C e 95 °C e tempo de imersão de 0,5 horas, todos os exemplares tem aproximadamente a mesma cor. Então, pode-se inferir que o aumento de temperatura não afeta, visualmente, a quantidade de extrativos solubilizados.

$m_s/m_a:1/10$		
25 °C/2 horas	25 °C/24 horas	25 °C/48 horas
		
60 °C/0,5 horas	60 °C/1 hora	60 °C/2 horas
		
80 °C/0,5 horas	80 °C/1 hora	80 °C/2 horas
		
85 °C/0,5 horas	90 °C/0,5 horas	95 °C/0,5 horas
		

Figura 4.1: Águas residuais obtidas após a imersão da serragem de madeira em diferentes temperaturas e tempos de residência

A Tabela 4.1 contém a porcentagem de extrativos solubilizada em cada uma das situações citadas acima. Pode-se observar que para 25 °C, o aumento do tempo de imersão das partículas de 2 horas para 24 horas resultou em uma maior quantidade de extrativos solubilizados. Entretanto, o aumento do tempo de imersão para 48 horas não mostrou ter o mesmo efeito. O mesmo padrão pode ser observado para 60 °C. Considerando a temperatura de 80 °C, pode-se concluir que o acréscimo de 30 minutos no tempo de imersão da primeira situação para a segunda causou um aumento na quantidade de extrativos em 7,6 %. Ao se aumentar o tempo de 1 hora para 2 horas, o

acrécimo nos extrativos foi de 6,3 %. No caso de 85 °C, 90 °C e 95 °C, a quantidade de extrativos solubilizados foi maior que a quantidade para 80 °C / 0,5 horas, porém menor que 80 °C / 1 hora.

Tabela 4.1: Porcentagem de extrativos solubilizados

Temperatura / Tempo de imersão	Porcentagem solubilizada (%)
25 °C/2 horas	0,232
25 °C/24 horas	0,282
25 °C/48 horas	0,282
60 °C/0,5 horas	0,319
60 °C/1 hora	0,346
60 °C/2 horas	0,347
80 °C/0,5 horas	0,381
80 °C/1 hora	0,410
80 °C/2 horas	0,436
85 °C/0,5 horas	0,398
90 °C/0,5 horas	0,392
95 °C/0,5 horas	0,403

Fotografias da água residual após a lavagem com teores de biomassa nas proporções de 1/10, 1/5 e 1/4 são mostradas na Figura 4.2. Observações visuais mostram uma água de cor mais escura com o decréscimo da quantidade de água na lavagem. A Tabela 4.2: apresenta os valores de extrativos solubilizados para diferentes valores de m_s/m_a . Pode-se observar que o aumento de extrativos foi praticamente proporcional à diminuição da quantidade de água.

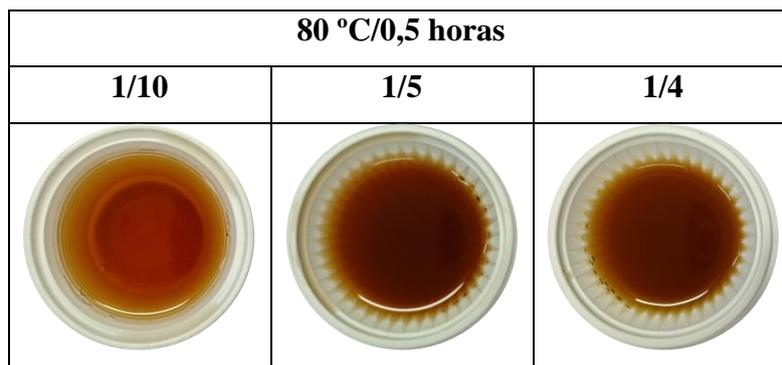


Figura 4.2: Águas residuais obtidas após imersão da serragem de madeira utilizando diferentes valores para m_s/m_a

Tabela 4.2: Extrativos solubilizados para diferentes valores de m_s/m_a

m_s/m_a	Porcentagem solubilizada (%)
1/10	0,341
1/5	0,669
1/4	0,816

A Figura 4.3 apresenta águas residuais dos tratamentos da serragem de madeira utilizando solução saturada de hidróxido de cálcio e solução com 4% de cloreto de cálcio. Observa-se que a inclusão de tais produtos não alterou significativamente a cor das amostras. A quantificação de extrativos solubilizados nestes dois casos não foi feita devido à impossibilidade de separar os extrativos do produto químico presente (Ca(OH)_2 e CaCl_2).

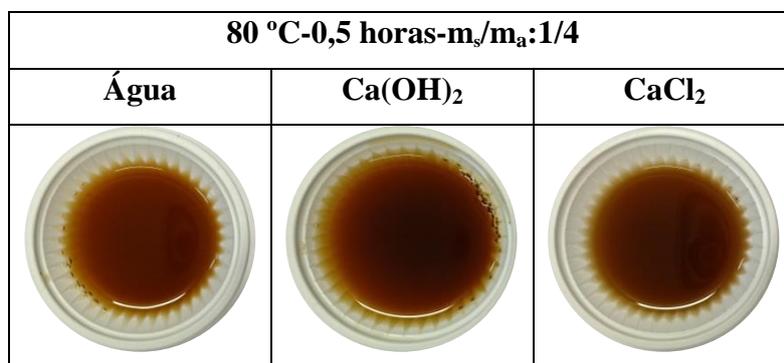


Figura 4.3: Águas residuais obtidas com a inclusão de produtos químicos na lavagem da serragem de madeira

4.2 Tempo de pega

Os resultados de tempos de pega inicial e final determinados pelo aparelho de Vicat para a matriz com a água deionizada (referência) e com a água residual oriunda dos diferentes tratamentos da serragem de madeira são apresentados na Figura 4.4. Os tempos inicial e final de pega para a referência ocorreram com 01:22 horas e 02:41 horas, respectivamente. Quando a matriz foi misturada com a água residual, a pega foi retardada. Para 25 °C/2 horas, os extrativos solubilizados retardaram o tempo inicial de pega em 01:01 horas e para 25 °C/24 horas retardaram 01:23 horas. O aumento do tempo de imersão para 48 horas não causou modificação no resultado inicial de pega. O tempo final de pega foi perturbado quase na mesma proporção. Para 25 °C/2 horas, o tempo final de pega foi maior que o da referência em 01:00 hora. Para 25 °C/24 horas e 25 °C/48 horas foi 01:15 horas.

Um comportamento similar foi observado para 60 °C. Para 60 °C/0,5 horas, o tempo inicial de pega foi 01:20 horas maior que a referência e para 60 °C/1 hora e 60 °C/2 horas foi por volta de 01:33. O tempo final de pega foi 01:22 horas maior para 60 °C/0,5 horas e 60 °C/1 hora e 01:37 horas para 60 °C/2 horas.

Para 80 °C/0,5 horas, os extrativos solubilizados na água retardaram o tempo inicial de pega em 01:48 horas e para 80 °C/1 hora eles retardaram 01:58 horas. Ao se aumentar o tempo de imersão para 2 horas, o tempo inicial de pega foi o mesmo para 80 °C/1 hora. O tempo final de pega apresentou o mesmo comportamento. Ele foi 01:35 horas maior para 80 °C/0,5 horas e 01:52 horas para os outros casos.

O ensaio com a água residual oriunda de 85 °C/0,5 horas teve o tempo inicial de pega retardado em 01:56 horas. 90 °C/0,5 horas e 95 °C/0,5 horas tiveram aproximadamente o mesmo resultado. O tempo final de pega foi aproximadamente o mesmo para os três exemplares.

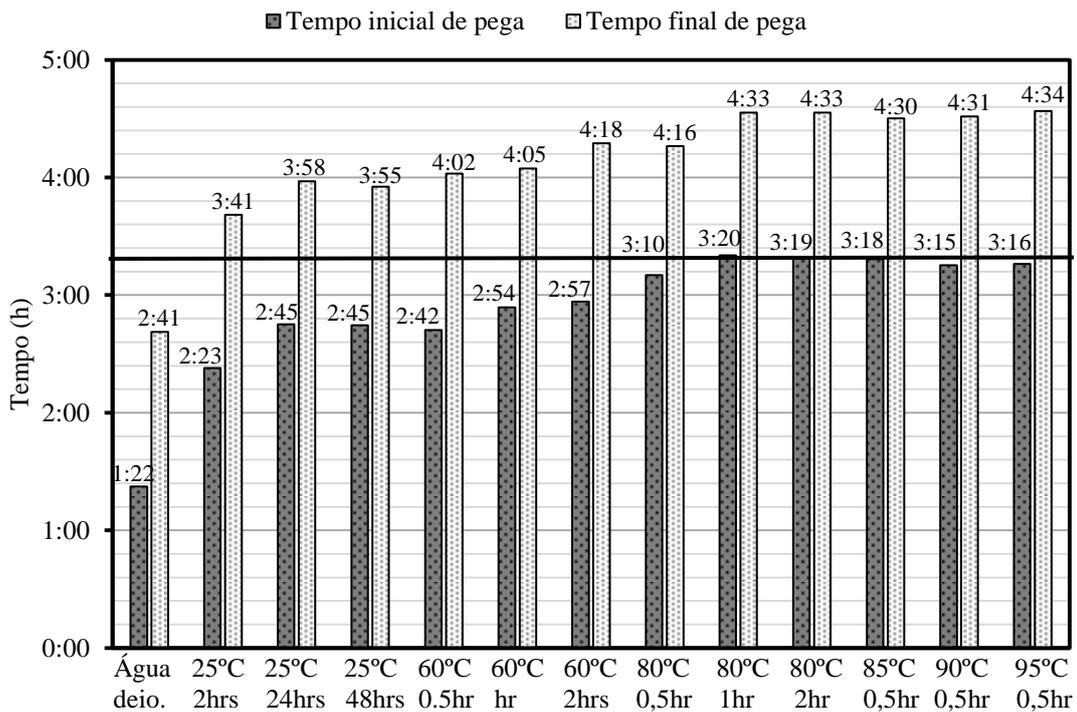


Figura 4.4: Resultados dos tempos inicial e final de pega para $m_s/m_a=1/10$

Pode-se observar na Figura 4.5 que os resultados para tempo inicial de pega para as amostras 1/5 e 1/4 apresentaram um retardo em relação à referência de 02:45 horas e 03:03 horas, respectivamente. O tempo final de pega sofreu um atraso de 02:58 horas e 03:35 horas.

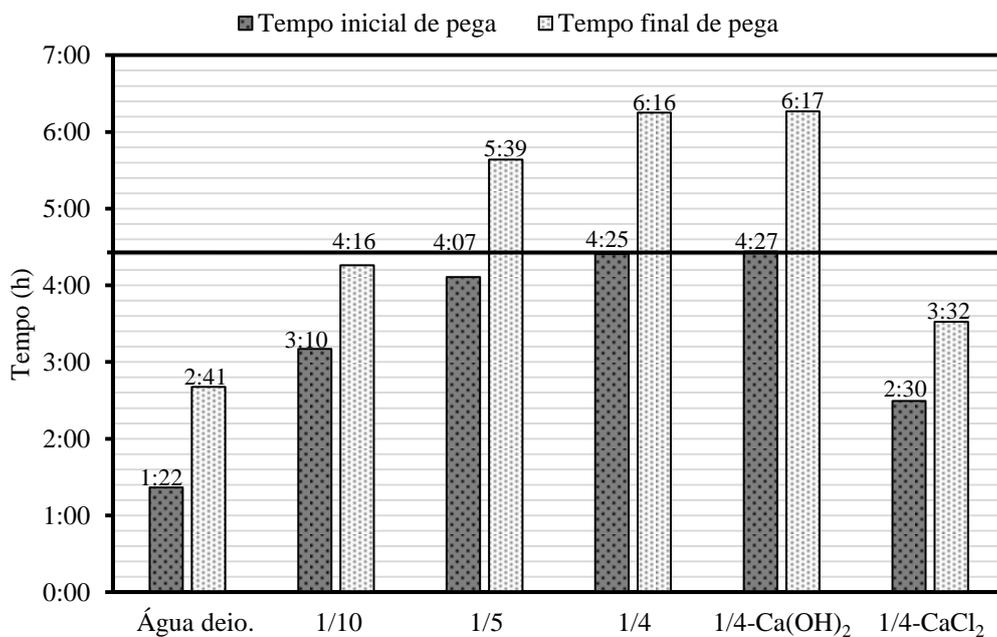


Figura 4.5: Resultados do tempos inicial e final de pega para diferentes valores de m_s/m_a

Para as amostras obtidas com Ca(OH)_2 e CaCl_2 , os resultados também podem ser observados na Figura 4.5. O exemplar preparado com água residual da lavagem com Ca(OH)_2 apresentou praticamente o mesmo resultado que o exemplar 1/4, levando a supor que a presença de Ca(OH)_2 não influenciou na solubilização de extrativos da serragem de madeira. Para a amostra com CaCl_2 este ensaio não permitiu uma avaliação do efeito de retardo na pega causado pelos extrativos solubilizados na água residual porque o cloreto de cálcio presente causa uma aceleração na pega do cimento, minimizando o efeito de retardo dos extrativos presentes.

4.3 Sistema de membranas

4.3.1 Osmose Inversa

A Figura 4.6 apresenta imagens de todas as águas residuais que foram submetidas à osmose inversa e de todos os permeados obtidos através deste processo. Observando as fotos de todas as amostras, percebeu-se visualmente uma retirada dos compostos dissolvidos na água, pois os permeados estão praticamente incolores. Não existem grandes diferenças, visuais, entre as amostras.

	Água residual	Permeado
S-1/10		
S-1/5		
S-1/4		
B-1/2,5		

Figura 4.6: Águas residuais antes e depois da osmose inversa

4.3.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

Os resultados de pH das amostras de águas residuais e permeados do processo de osmose inversa são apresentados na Figura 4.7. Todas as águas residuais apresentaram valores de pH abaixo de 7, sendo classificados com ácidos. Após o processo de osmose inversa, os permeados S-1/10, S-1/5 e S-1/4 apresentaram aumentos sutis em seus valores, porém continuaram na faixa ácida. O pH da amostra B-1/2,5 foi o único que apresentou pH maior que 7 após a filtração. Segundo o Conama (2011), é recomendado que o pH de efluentes a serem lançados no meio ambiente esteja entre 5 e 9. Em um possível caso de descarte, todas as águas residuais e permeados se encontram nesta faixa.

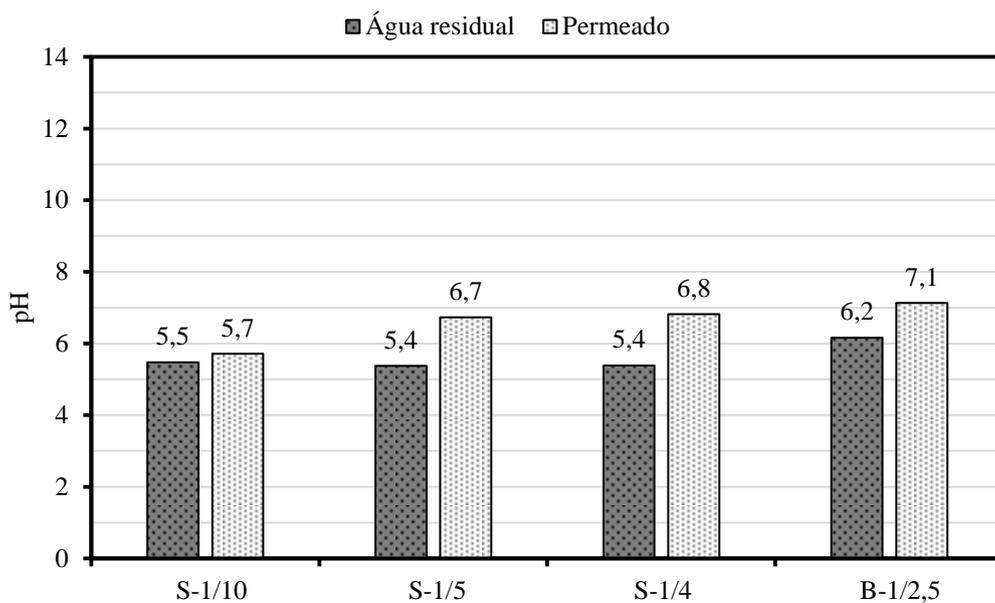


Figura 4.7: Valores de pH

4.3.1.2 Condutividade iônica

A condutividade iônica expressa a presença de íons em solução e quanto maior seu valor maior a quantidade de íons na amostra (APHA, 1999). Von Sperling (2007) cita que águas naturais geralmente apresentam resultados de condutividade iônica entre 10 e 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais podem chegar a valores até 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os resultados do ensaio de condutividade iônica nas águas residuais e nos permeados estão ilustrados na Figura 4.8. Todas as águas residuais apresentaram valores acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estando fora da faixa citada para águas naturais. Após a osmose inversa, as amostras S-1/10, S-1/5 e S-1/4 apresentaram uma grande redução em seus valores de condutividade iônica, respectivamente iguais a 90,2 %, 96,9 % e 94,6 % e se enquadraram na faixa proposta por Von Sperling (2007). Apesar de B-1/2,5 ter apresentado uma redução de 90,8 %, esta amostra ainda permaneceu acima da faixa.

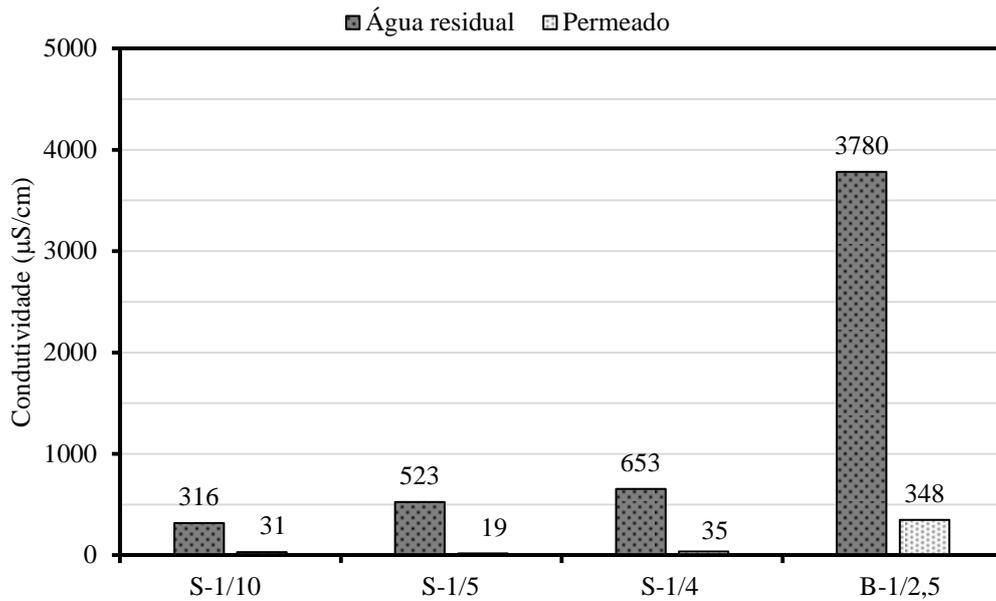


Figura 4.8: Condutividade iônica

4.3.1.3 Absorvância 254 nm

Os resultados de absorvância em comprimento de onda de 254 nm são apresentados na Figura 4.9. Foi observado que após o processo de osmose inversa houve uma diminuição nos valores de absorvância. De acordo com Andrade Jr. (2004), é possível afirmar que o processo utilizado reduziu a presença de compostos orgânicos de todas elas. As amostras S-1/10, S-1/5 e S-1/4 foram as que apresentaram uma maior redução entre as medidas.

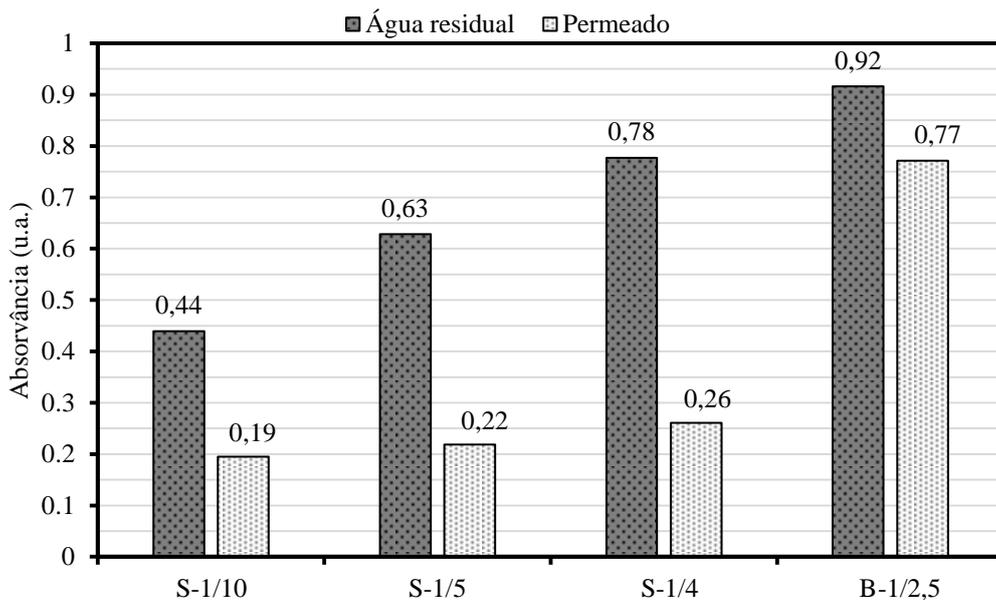


Figura 4.9: Absorvância em comprimento de onda de 254 nm

4.3.2 Nanofiltração

A Figura 4.10 apresenta fotos de todas as amostras submetidas à nanofiltração e seus respectivos permeados. Observou-se, visualmente, uma grande diferença de cor entre águas residuais e permeados, o que pode ser explicado pela retirada de parte dos compostos dissolvidos na água. No entanto, o permeado não ficou tão transparente quanto o do processo de osmose inversa. Isso pode ser justificado pelo tipo de membrana utilizado. A membrana de nanofiltração permite a passagem de água, sais e moléculas de baixa massa molar enquanto a da osmose inversa permite apenas a passagem da água.

	Água residual	Permeado
S-1/4-Ca(OH) ₂		
S-1/4-CaCl ₂		
B-1/2,5-Ca(OH) ₂		
B-1/2,5-CaCl ₂		

Figura 4.10: Águas residuais antes e depois da nanofiltração

4.3.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

A Figura 4.11 apresenta os resultados de pH de águas residuais e permeados referentes à nanofiltração. As águas residuais S-1/4-Ca(OH)₂ e B-1/2,5-Ca(OH)₂ podem ser

classificadas como básicas, pois apresentaram valores acima de 7, enquanto S-1/4-CaCl₂ e B-1/2,5-CaCl₂ são ácidas. Após a nanofiltração, o pH do permeado S-1/4-Ca(OH)₂ praticamente não se alterou (redução de 0,53 %) e o pH do permeado B-1/2,5-Ca(OH)₂ teve um redução de 27,1 %, porém ele continuou acima de 7. O permeado S-1/4-CaCl₂ mostrou um pH levemente acima de 7, enquanto o B-1/2,5-CaCl₂ continuou sendo classificado como ácido. As águas residuais S-1/4-Ca(OH)₂ e B-1/2,5-Ca(OH)₂ e o permeado S-1/4-Ca(OH)₂ não se enquadraram na faixa entre 5 e 9 proposta pelo Conama (2011).

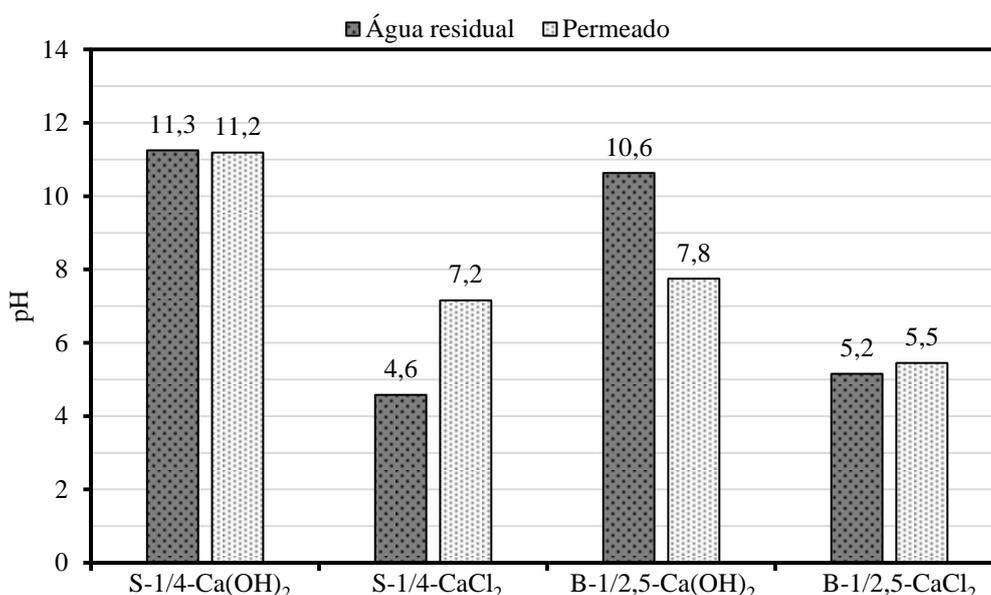


Figura 4.11: Valores de pH

4.3.2.2 Condutividade iônica

Os resultados do ensaio de condutividade iônica nas águas residuais e permeados da nanofiltração estão ilustrados na Figura 4.12. As amostras de águas residuais que continham teores de Ca(OH)₂ e CaCl₂ apresentaram valores muito acima de 1000 μS/cm (VON SPERLING, 2007), especialmente as que continham CaCl₂. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de cloreto de cálcio colocada no momento da lavagem comparada ao hidróxido de cálcio. Após a nanofiltração o valor de condutividade iônica aumentou um pouco para a amostra B-1/2,5-Ca(OH)₂ e diminuiu para as outras amostras.

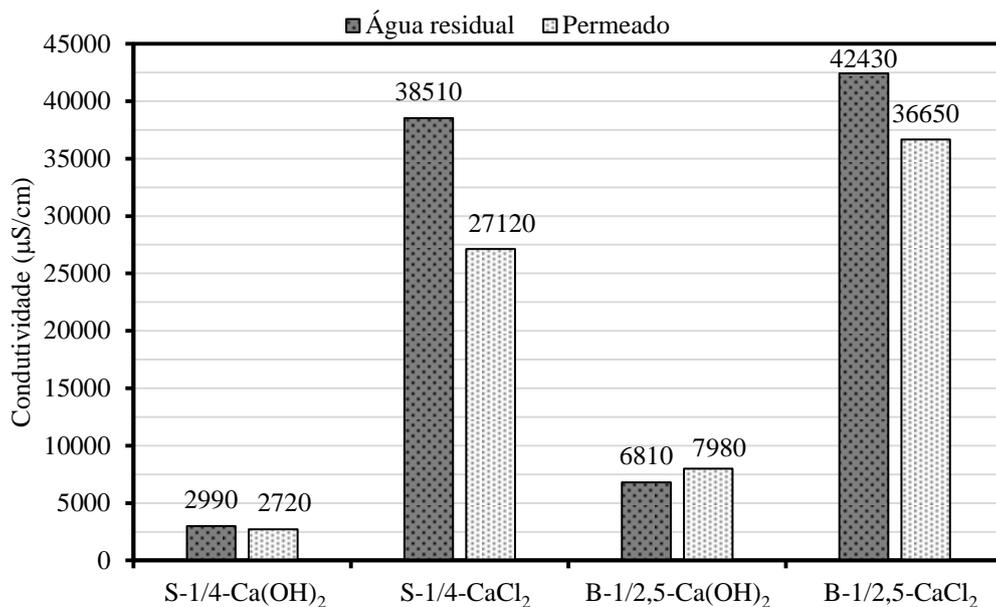


Figura 4.12: Condutividade iônica

4.3.2.3 Absorvância 254 nm

Os resultados de absorvância em comprimento de onda de 254 nm são apresentados na Figura 4.13. Foi observado que após o processo de nanofiltração houve uma diminuição nos valores de absorvância, o que leva a acreditar que este processo também reduziu a presença de compostos orgânicos em todas as amostras, conforme citado por Andrade Jr. (2004).

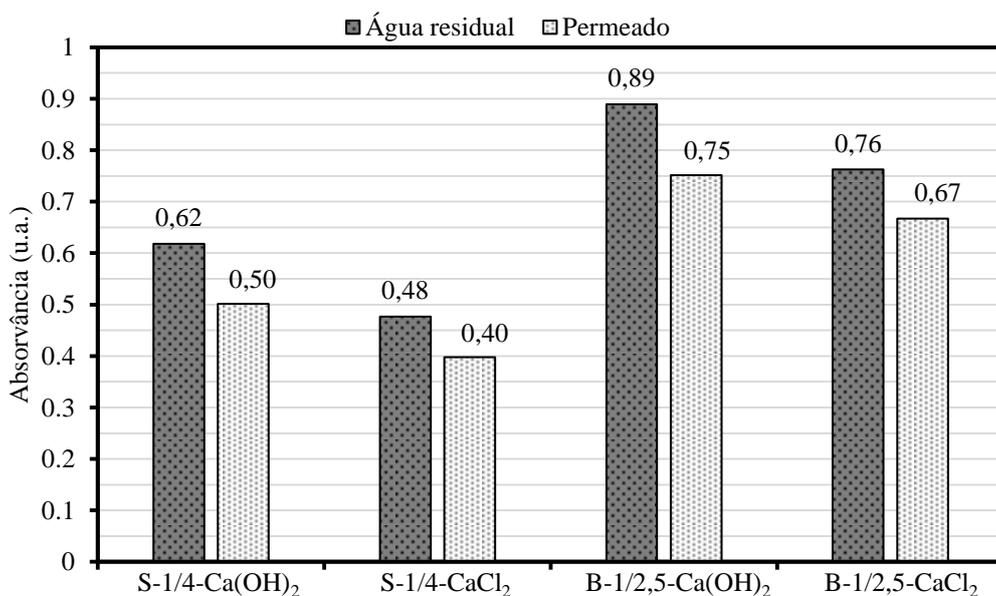


Figura 4.13: Absorvância em comprimento de onda de 254 nm

4.3.2.4 Cromatografia de íons

A Figura 4.14 apresenta os resultados encontrados para o ensaio de cromatografia de íons utilizando coluna de cátions. A amostra S-1/4-Ca(OH)₂ acusou a presença de sódio, amônia, potássio, magnésio e cálcio, enquanto a amostra B-1/2,5-Ca(OH)₂ apresentou sódio, amônia, potássio e magnésio. Em ambos os casos, o elemento em maior concentração foi o potássio (Figura 4.14.a). A amostra S-1/4-CaCl₂ apresentou potássio, magnésio e sódio e a amostra B-1/2,5-CaCl₂ apresentou potássio e magnésio. Em ambos os casos, o cátion em maior concentração foi o magnésio (Figura 4.14.b). A ausência de íons cálcio pode estar associada à formação de complexos químicos entre compostos orgânicos dos extrativos restantes no permeado e os íons Ca²⁺. (MILLER & MOSLEMI, 1991a).

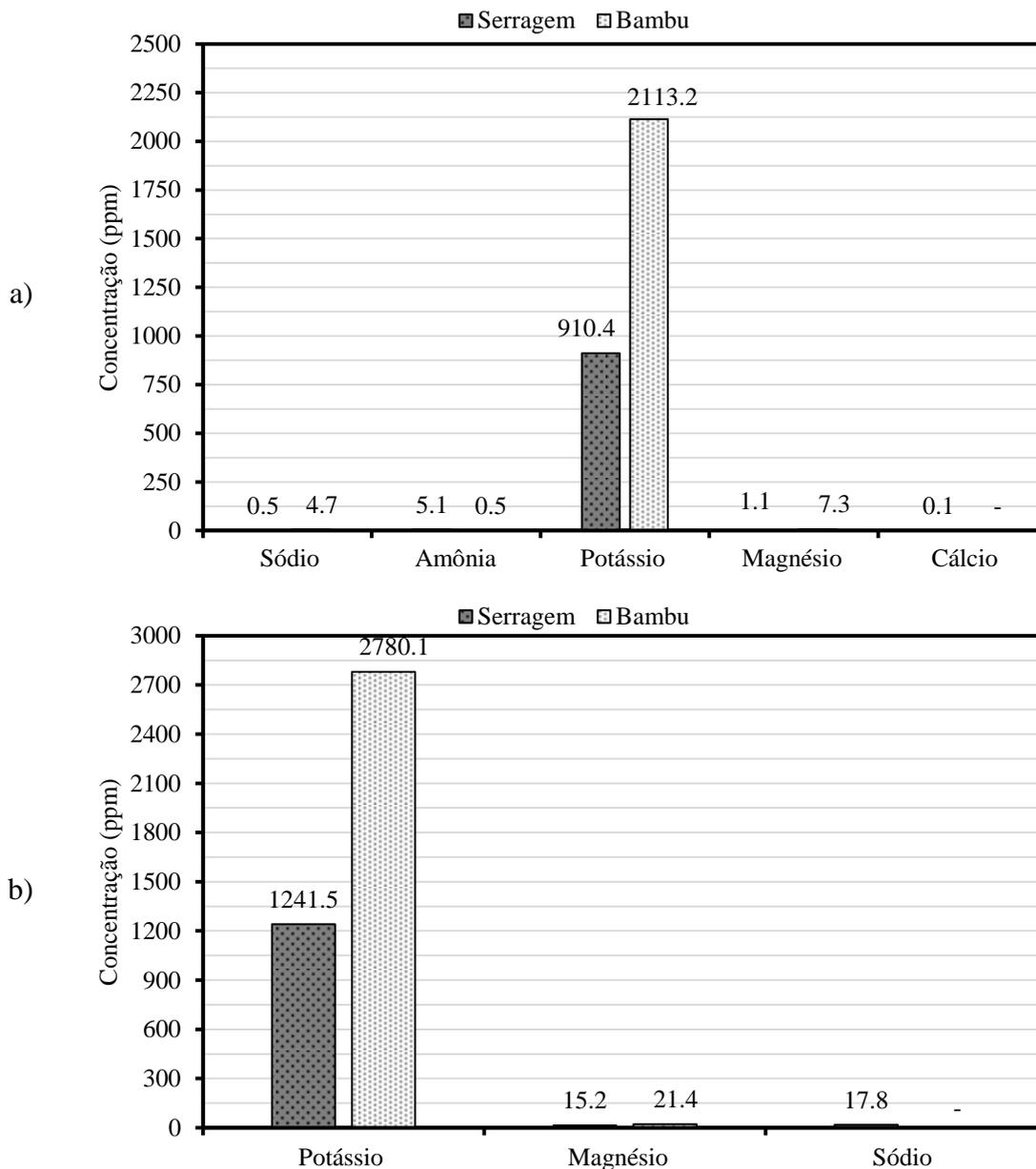


Figura 4.14: Cromatografia de cátions a) Permeados S-1/4-Ca(OH)₂ e B-1/2,5-Ca(OH)₂
 b) Permeados S-1/4-CaCl₂ B-1/2,5-CaCl₂

Os resultados da cromatografia de íons com coluna de ânions estão apresentados na Figura 4.15. A amostra S-1/4-CaCl₂ apresentou brometo, nitrato, fosfato e sulfato enquanto a amostra S-1/4-CaCl₂ acusou a presença de fluoreto, brometo, nitrato, fosfato e sulfato. Para todos os ânions presentes, as amostras de permeado relacionadas à serragem apresentaram uma quantidade menor de íons que aquelas relacionadas ao bambu. Da mesma forma, a ausência de cloreto pode estar associada à formação de complexos químicos entre compostos orgânicos dos extrativos restantes no permeado e o íon cloreto (Cl⁻). (MILLER & MOSLEMI, 1991a).

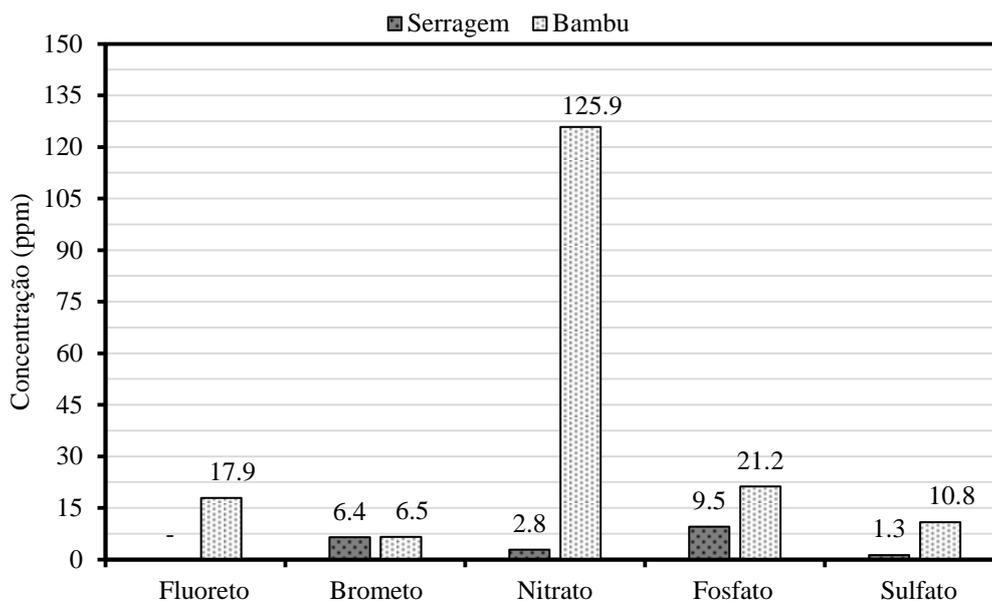


Figura 4.15: Cromatografia de ânions dos permeados S-1/4-CaCl₂ e B-1/2,5-CaCl₂

4.4 Hidratação da matriz por calorimetria isotérmica

As curvas de fluxo de calor obtidas no ensaio de calorimetria isotérmica são apresentadas na Figura 4.16. A duração dos períodos de indução, os tempos de início e fim da aceleração, a taxa de reação e o fluxo máximo estão apresentados na Tabela 4.3.

Comparando primeiramente as curvas da pasta A_{deio} e da pasta com água residual da lavagem que não passou pelo sistema de membranas (A_{ser}), foi observado um retardo na hidratação da segunda. O período de indução da A_{deio} foi 1,20 h, enquanto a A_{ser} apresentou um retardo de 2,66 h. Isso ocorreu devido à presença de extrativos da serragem de madeira solubilizados na A_{ser} . Ao se analisar as pastas fabricadas com águas oriundas do sistema de membranas, observou-se que a curva da pasta A_{osmo} praticamente coincidiu com a A_{deio} (retardo de apenas 0,04 h). Isso é um indício de que a osmose inversa retirou os extrativos, corroborando com os resultados encontrados nas análises dessa água discutidos no item 4.3.1. A A_{nCH} também não apresentou um retardo expressivo, aproximadamente 0,06 h, já o período de indução da pasta A_{nCl} apresentou uma aceleração de 0,4 h (24 min) em relação à A_{deio} , devido à provável presença de CaCl₂, já que a membrana de nanofiltração permitiria a passagem de íons da água residual para o permeado.

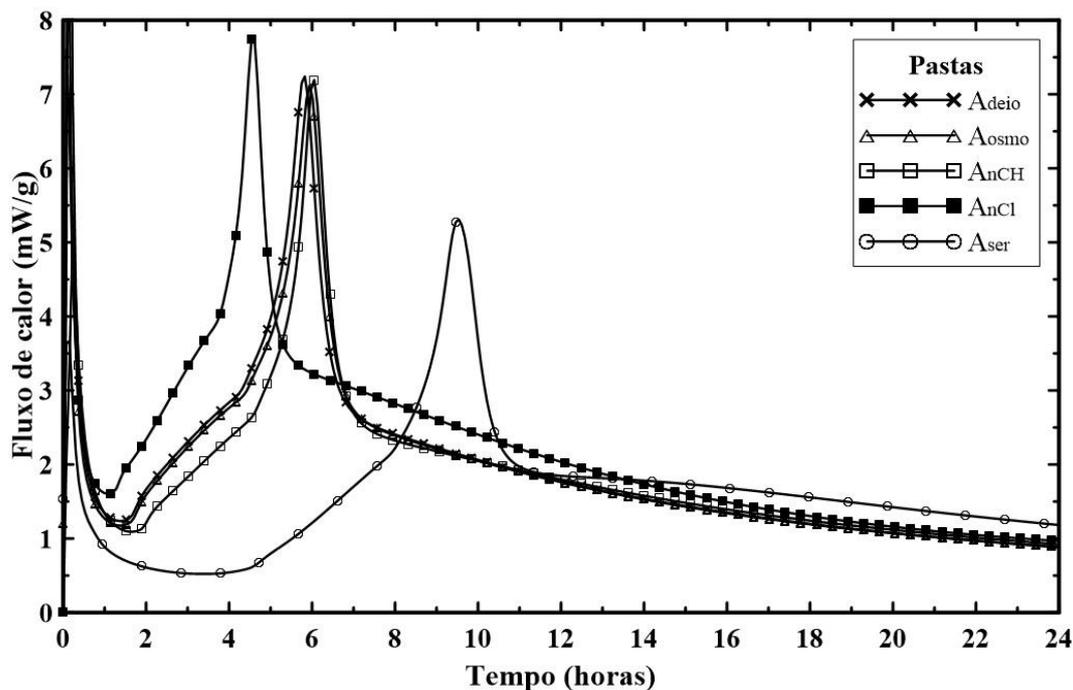


Figura 4.16: Curvas de liberação de calor até 24 horas (águas relacionadas à serragem)

Tabela 4.3: Dados dos períodos de hidratação (águas relacionadas à serragem)

Pasta	Indução	Aceleração			Fluxo máximo (mW/g)
	Duração (h)	Início (h)	Fim (h)	Taxa de reação	
A_{deio}	1,203	1,594	5,824	0,6092	7,239
A_{ser}	3,862	4,330	9,532	0,4792	5,307
A_{osmo}	1,243	1,620	5,938	0,5980	7,115
A_{nCH}	1,259	1,877	6,052	0,5367	7,193
A_{nCl}	0,803	1,150	4,577	0,9703	7,742

Analisando os dados da Tabela 4.3 referentes aos períodos de aceleração percebeu-se que estes foram praticamente iguais para as pastas A_{deio} , A_{osmo} e A_{nCH} . O mesmo foi observado para os valores de fluxo máximo, evidenciando a eficiência dos processos de tratamento aplicados às águas. Apesar disto, suas taxas de reação foram distintas, sendo a da pasta A_{nCH} a menor. Devido à presença de $CaCl_2$, a taxa de reação para a pasta A_{nCl} foi maior que a taxa das outras pastas, resultando em um período de aceleração mais curto. O oposto foi observado para a pasta A_{ser} . Esta pasta apresentou a menor taxa de

reação e o período de aceleração mais longo devido à maior quantidade de extrativos solubilizados.

O fluxo de calor máximo da A_{nCl} foi 6,5 % maior que o da A_{deio} , devido à presença de $CaCl_2$ e o da A_{ser} foi 26,7 % menor que o fluxo de calor máximo da A_{deio} , devido à presença de extrativos. Os valores para a A_{osmo} e a A_{nCH} foram apenas 1,5 % e 0,5 % menores que o da A_{deio} .

As curvas de calor acumulado durante as 166 h de ensaio estão ilustradas na Figura 4.17 e os valores de calor acumulado estão na Tabela 4.4. De acordo com os resultados obtidos, a pasta A_{nCl} apresentou o maior calor acumulado durante todo o ensaio e a pasta A_{ser} apresentou o menor calor acumulado na primeira metade do ensaio, atingindo aproximadamente o mesmo valor que a A_{osmo} e a A_{nCH} ao final das 166 h. A curva da pasta A_{deio} se mostrou levemente deslocada para cima em relação à A_{osmo} e à A_{nCH} durante todo o ensaio.

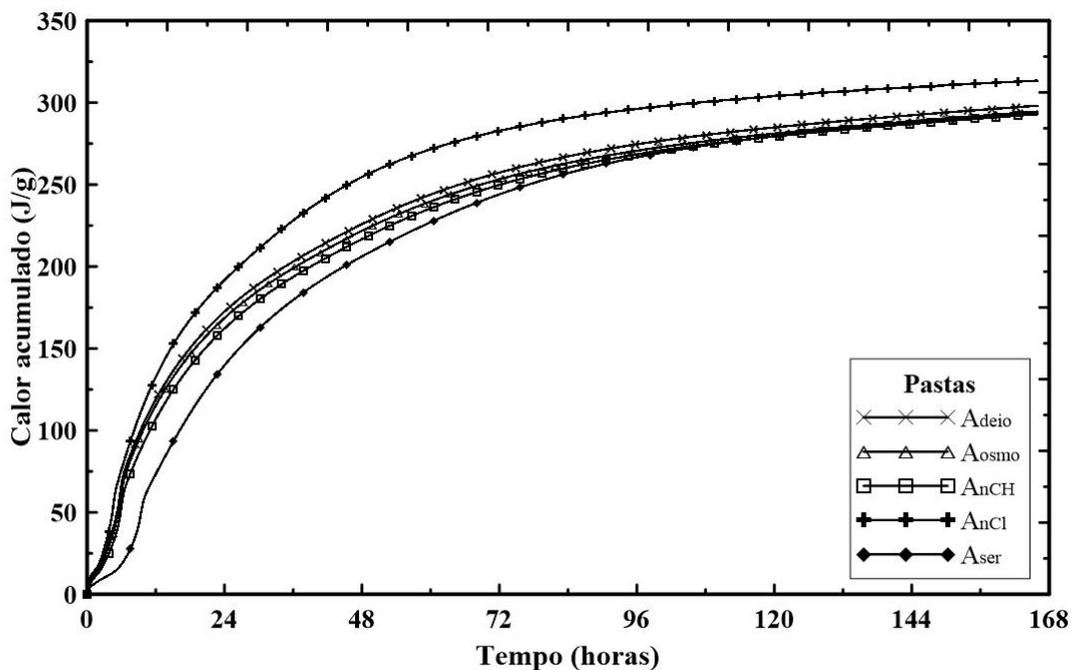


Figura 4.17: Curvas de calor acumulado (águas relacionadas à serragem)

Tabela 4.4: Calor total acumulado durante a calorimetria isotérmica

Pasta	Calor acumulado (J/g)
A_{deio}	298,104
A_{ser}	293,974
A_{osmo}	294,518
A_{nCH}	292,887
A_{nCl}	313,386

A Figura 4.18 e a Tabela 4.5 apresentam os resultados da calorimetria isotérmica realizada em pastas com diferentes águas relacionadas ao bambu. Um comportamento similar ao caso da serragem foi observado. A pasta A_{nCl} apresentou uma leve aceleração ($\sim 0,3$ h) no período de indução em relação à pasta A_{deio} e a A_{bambu} apresentou um retardo da indução de 2,31 h. Esses resultados são mais um indício para a presença de acelerador ($CaCl_2$) na pasta A_{nCl} e de extrativos vegetais na A_{bambu} . Os períodos de indução da A_{osmo} e da A_{nCH} apresentaram uma duração levemente maior que o da A_{deio} , 2,5 min e 20,8 min, respectivamente.

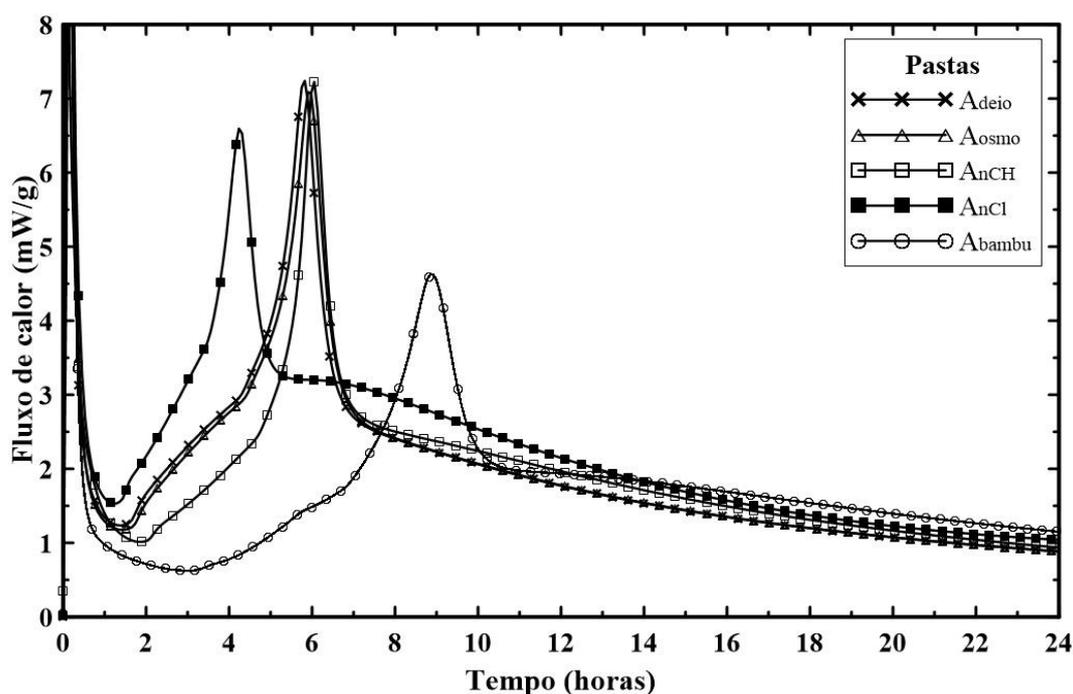


Figura 4.18 Curvas de liberação de calor até 24 horas (águas relacionadas ao bambu)

Tabela 4.5: Dados dos períodos de hidratação (águas relacionadas ao bambu)

Pasta	Indução	Aceleração			
	Duração (h)	Início (h)	Fim (h)	Taxa de reação	Fluxo máximo (mW/g)
A_{deio}	1,203	1,594	5,824	0,6092	7,239
A_{bambu}	3,515	3,811	8,877	0,2626	4,627
A_{osmo}	1,245	1,666	5,901	0,6240	7,089
A_{nCH}	1,550	2,021	6,052	0,5046	7,225
A_{nCl}	0,900	1,392	4,236	1,0173	6,595

A pasta A_{nCl} apresentou o menor tempo de aceleração e sua taxa de reação foi superior à taxa das outras pastas. A pasta A_{bambu} apresentou o maior período de aceleração em conjunto com a menor taxa de reação devido à maior quantidade de extrativos presente na água de amassamento desta pasta. A única diferença percebida neste caso em relação ao anterior foi que a taxa de reação da A_{osmo} apresentou um valor levemente superior (~2,5 %) ao da A_{deio} .

A pasta que apresentou o maior fluxo de calor máximo foi a A_{deio} , seguida da A_{nCH} e A_{osmo} . A pasta A_{bambu} foi a que apresentou o menor valor de fluxo de calor máximo, devido à maior quantidade de extrativos presente nela.

As curvas de calor acumulado durante as 166 h de ensaio estão ilustradas na Figura 4.19 e os valores de calor acumulado estão na Tabela 4.6. De acordo com os resultados obtidos, a pasta A_{nCl} apresentou maior calor acumulado durante todo o ensaio. Até aproximadamente 24 h de ensaio a pasta A_{bambu} apresentou o menor valor de calor acumulado. Após isso, a curva foi se igualando às outras e atingiu um valor levemente superior ao das curvas A_{deio} , A_{osmo} e A_{nCH} ao final das 166 h.

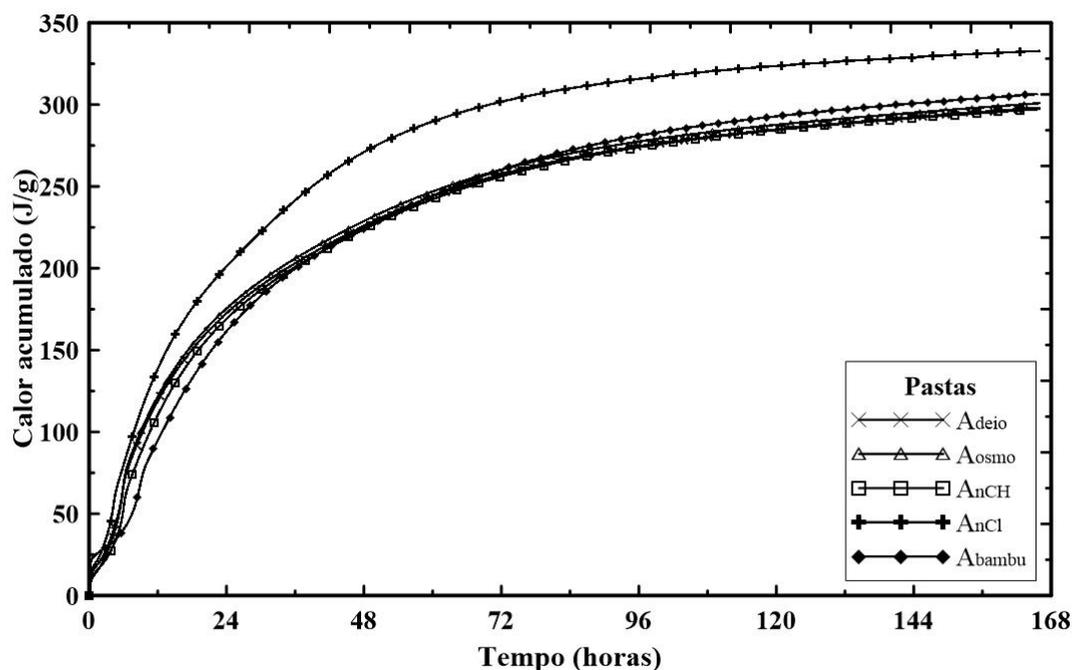


Figura 4.19: Curvas de calor acumulado (águas relacionadas ao bambu)

Tabela 4.6: Calor total acumulado durante a calorimetria isotérmica

Pasta	Calor acumulado (J/g)
A _{deio}	298,104
A _{bambu}	306,365
A _{osmo}	300,843
A _{nCH}	297,202
A _{nCl}	332,771

Os resultados da calorimetria isotérmica evidenciaram que os extrativos retardaram as reações de hidratação da matriz cimentícia estudada. Mostraram também que o sistema de membranas foi efetivo na retirada desses extrativos da água residual. No caso das pastas A_{nCl}, a aceleração percebida na curva em relação à curva da A_{deio} mostrou que a membrana permitiu a passagem do acelerador utilizado na lavagem.

Como tentativa de explicar os efeitos das pozolanas nos resultados de calorimetria isotérmica, foi ensaiada uma mistura de cimento e água deionizada. A Figura 4.20 apresenta a curva obtida com cimento e água deionizada e com a matriz e água deionizada. O período de indução da pasta Cimento durou 1,586 h, valor este maior que o período de indução da pasta Pozolanas, que foi 1,203 h. O período de aceleração das

pastas foi bem diferente. Enquanto a aceleração da pasta Pozolanas ocorreu em 4,23 h, com um pico de fluxo máximo de calor com 7,239 mW/g, a aceleração da pasta Cimento gastou 9,825 h para ser completada, atingindo um pico de fluxo máximo de calor de 5,745 mW/g. A curva da pasta Cimento apresentou uma liberação de calor nas primeiras horas menor que a esperada, o que leva a supor que o cimento já teria sofrido uma pré-hidratação.

As curvas de calor acumulado estão representadas na Figura 4.21. Para as primeiras 69 horas de ensaio a curva Cimento apresentou um valor de 307,183 J/g e a curva Pozolanas apresentou um valor de 254,327 J/g. Janotka *et al.* (2010) também perceberam este comportamento em pastas com substituição de cimento por metacaulinita. Eles justificam que esta diferença de valores pode ser devido às reações exotérmicas de um sistema cimento + metacaulinita liberar menos calor do que um sistema com cimento apenas.

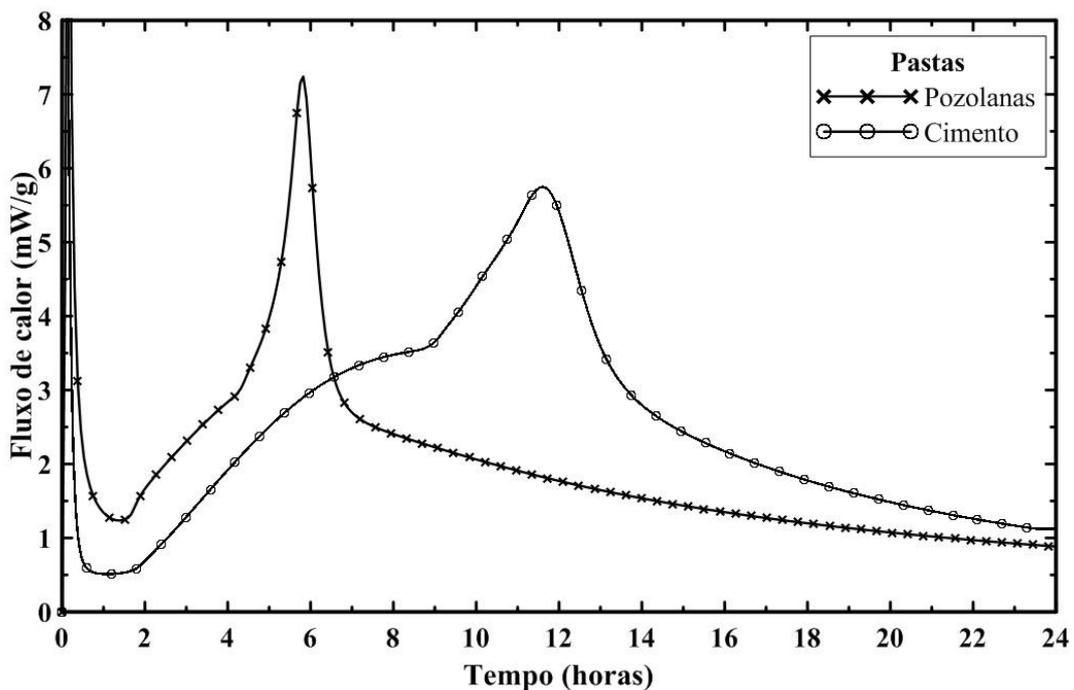


Figura 4.20: Curvas de liberação de calor até 24 horas

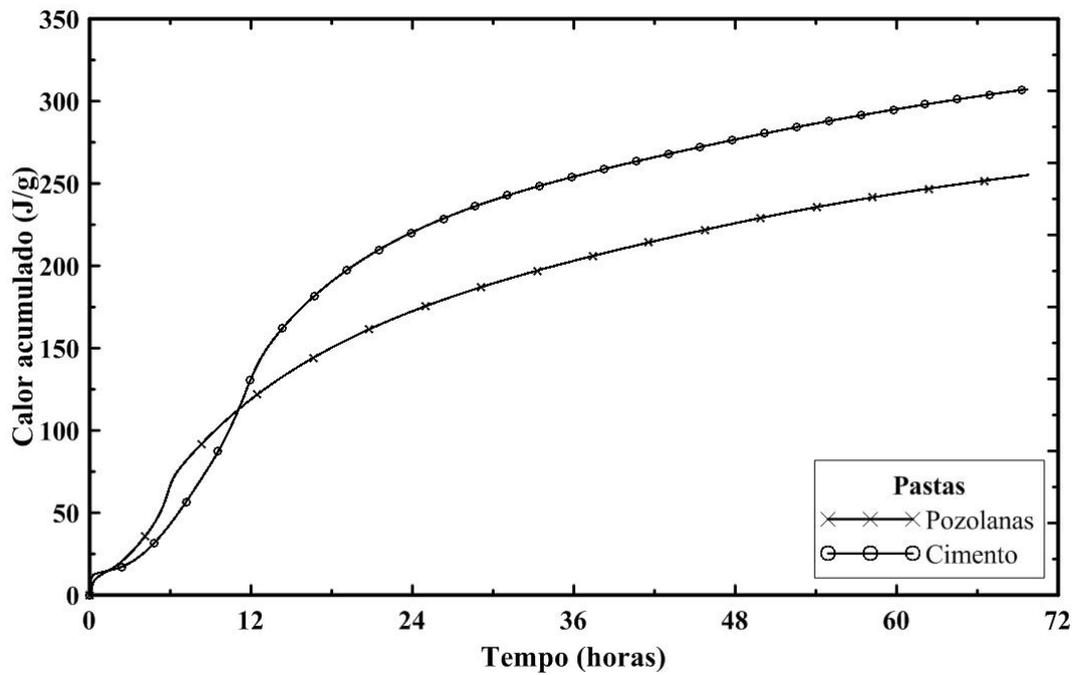


Figura 4.21: Curvas de calor acumulado durante 69 horas de ensaio

4.5 Hidratação do bioconcreto

4.5.1 Cinética de hidratação pela velocidade do pulso ultrassônico

A Figura 4.22 apresenta as curvas de velocidade do pulso ultrassônico *versus* tempo para os bioconcretos em estudo. A cura em temperatura ambiente não foi possível por problemas apresentados na aquisição dos dados durante o ensaio, por isso os bioconcretos foram curados a uma pressão de aproximadamente 54 atm e uma temperatura de 25 °C. A Tabela 4.7 contém os valores do tempo correspondente ao patamar de percolação e as inclinações da região ascendente do gráfico.

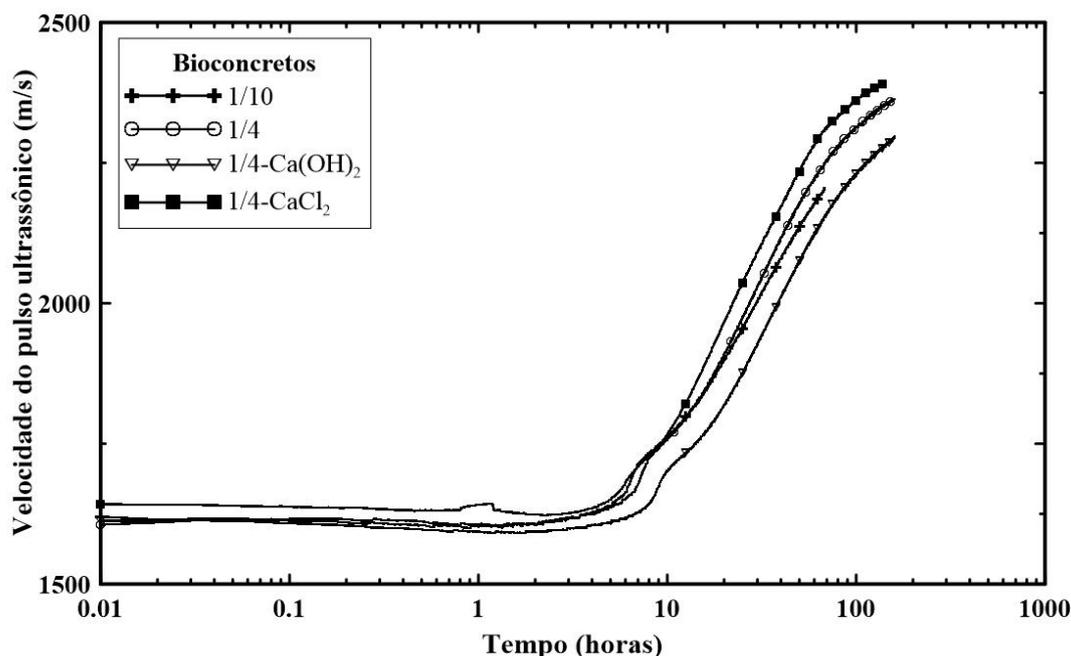


Figura 4.22: Curvas de velocidade do pulso ultrassônico *versus* tempo

Tabela 4.7: Patamar de percolação e inclinação da região intermediária das reações de hidratação

Bioconcreto	Patamar de percolação (P_p)		α_1	α_2
	x	y		
1/10	4,99	1601,36	58,208	11,811
1/4	5,69	1601,23	57,13	10,506
1/4-Ca(OH)₂	6,14	1570,05	36,311	9,9052
1/4-CaCl₂	3,91	1612,77	32,621	15,473

O patamar de percolação (ponto P_p), ou ponto de pega, foi atingido primeiro para o bioconcreto tratado com água e CaCl_2 . O segundo bioconcreto a atingir o P_p foi o fabricado com partículas tratadas utilizando m_s/m_a :1/10, seguido do m_s/m_a :1/4 e por último o fabricado com partículas tratadas com solução saturada com hidróxido de cálcio. Este resultado leva a acreditar que o cloreto de cálcio possivelmente ajudou na solubilização dos extrativos da serragem de madeira ou então parte dele ficou aderido às partículas.

Após o patamar de percolação, iniciou-se o período de aceleração do ensaio, que apresentou uma dupla inclinação. Para as misturas 1/10 e 1/4- CaCl_2 , essa primeira inclinação ocorreu a partir das 6 e 7 horas de ensaio, para 1/4 foi entre 7 e 8 horas e para

1/4-Ca(OH)₂ foi entre 9 e 10 horas. Neste período as inclinações de 1/10 e 1/4 foram próximas e maiores que as das outras duas misturas. Entretanto, com a mudança de inclinação, a aceleração de 1/4-CaCl₂ ultrapassou todas as outras, seguida por 1/10, 1/4 e 1/4-Ca(OH)₂.

Neste ensaio, o período de aceleração também apresentou uma dupla inclinação, assim como no ensaio de calorimetria isotérmica, o que leva a acreditar que é um efeito das pozolanas utilizadas na mistura.

4.5.2 Elevação adiabática de temperatura

A Figura 4.23 apresenta as curvas de evolução da temperatura, sob condições adiabáticas, das misturas com serragem de madeira com diferentes tratamentos para retirada de parte dos extrativos.

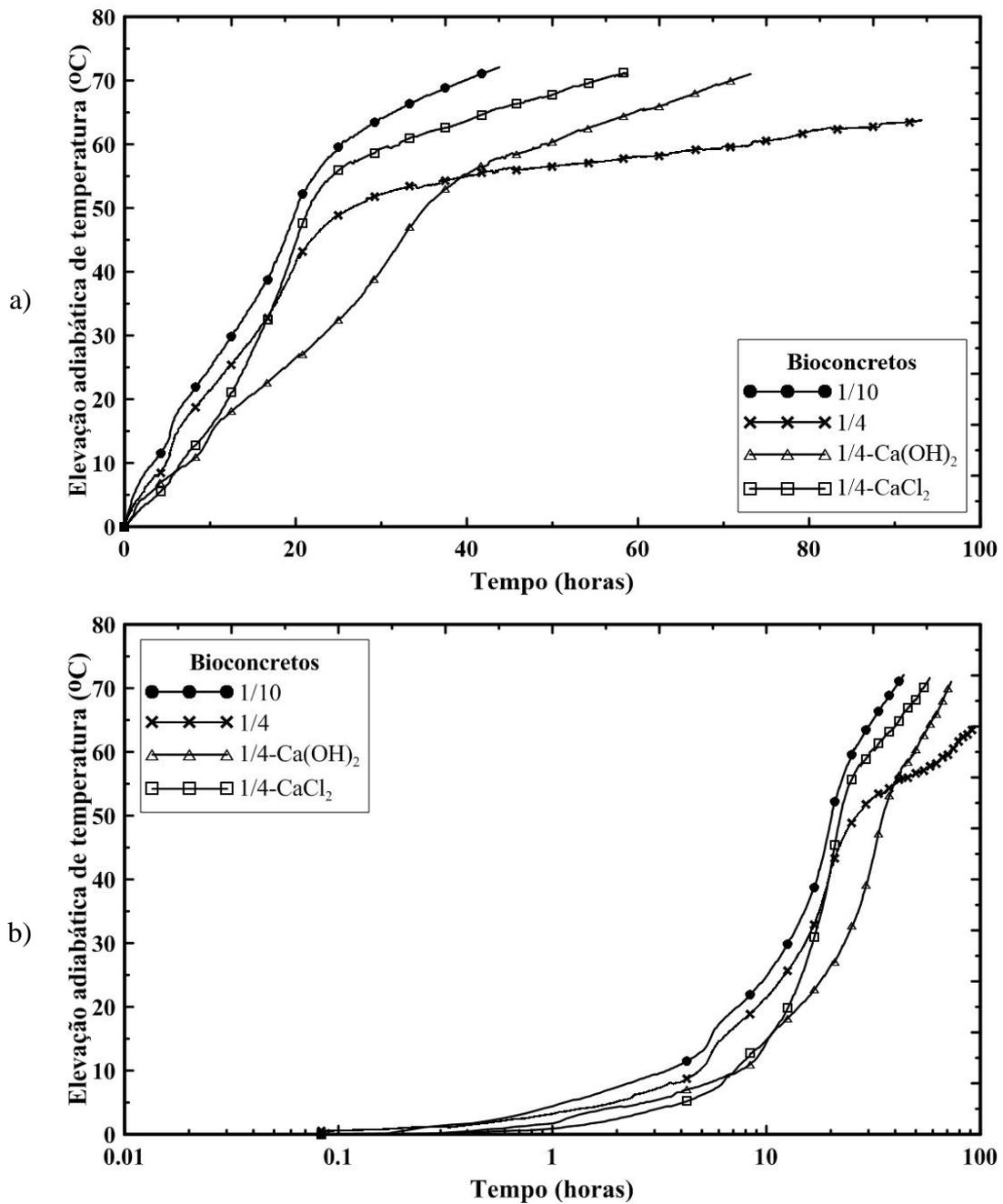


Figura 4.23: Elevação adiabática de temperatura a) Escala linear b) Escala logarítmica
 A temperatura inicial das misturas foi cerca de $15 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e os ensaios foram interrompidos no momento em que a temperatura de $90 \text{ }^\circ\text{C}$ foi atingida. Optou-se por interromper o ensaio nesta temperatura porque pela experiência de Siqueira (2014) o controle do equipamento para temperaturas próximas aos $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ficaria difícil. A Tabela 4.8 contém os resultados de elevação de temperatura para 24 h e 48 h de ensaio.

Tabela 4.8: Resultados dos testes de elevação adiabática de temperatura

Bioconcreto	T (°C)	
	24 h	48 h
1/10	58,0	73,8
1/4	47,9	56,3
1/4-Ca(OH)₂	31,1	59,4
1/4-CaCl₂	54,7	67,6

Observando-se as curvas experimentais apresentadas, nota-se que até cerca de 3 horas de ensaio as amostras 1/10, 1/4 e 1/4-CaCl₂ apresentaram um período de baixa liberação de calor (período de indução). Este período para a amostra 1/4-Ca(OH)₂ durou cerca de 5 horas. Foi possível observar também uma dupla inclinação do trecho correspondente ao período de aceleração, em que a mudança de inclinação para 1/10, 1/4 e 1/4-CaCl₂ ocorreu em aproximadamente 16 horas e para Ca(OH)₂ ocorreu em 28 horas. Esta dupla inclinação também foi observada nos resultados de velocidade de pulso ultrassônico e nas pastas dos ensaios de calorimetria isotérmica. Após o período de aceleração, que para 1/10, 1/4 e 1/4-CaCl₂ encerrou com aproximadamente 24 horas, a temperatura continuou subindo, porém em uma taxa menor. Para 1/4-Ca(OH)₂ o período de aceleração encerrou com aproximadamente 40 horas.

A partir das curvas da Figura 4.23, percebe-se que a mistura 1/10 foi a que atingiu as maiores temperaturas no menor tempo. Em apenas 24 h ela atingiu uma temperatura de 58 °C. Para atingir esta mesma temperatura a mistura 1/4-CaCl₂ gastou 27,3 h, a mistura 1/4-Ca(OH)₂ gastou 44,1 h e 1/4 levou 59,3 h,.

Para o bioconcreto 1/4 foi moldada uma mistura somente com cimento e serragem para comparação com o resultado do bioconcreto com as pozolanas. Como pode-se observar na Figura 4.24 e Figura 4.25, o bioconcreto 1/4-Cimento apresentou um período de indução 7 horas maior que o período de indução de 1/4-Pozolanas. O período de aceleração de 1/4-Cimento apresentou uma única inclinação, comportamento diferente da outra mistura, sendo este mais um indício que a dupla inclinação é resultante de algum efeito das pozolanas. O período de aceleração de ambos os bioconcretos se encerrou com aproximadamente 24 horas, apresentando depois desse momento um aumento de temperatura a uma taxa menor. Com aproximadamente 54,5 h de ensaio as curvas se cruzaram e a partir deste momento o bioconcreto com apenas cimento e serragem de madeira apresentou uma temperatura ligeiramente maior do que o

bioconcreto com as pozolanas. Observa-se, no entanto, que até 78 h essa diferença é inferior a 2 °C. A Tabela 4.9 contém os resultados de elevação de temperatura para 24 h e 48 h de ensaio das misturas 1/4-Pozolanas e 1/4-Cimento, onde se observa que até 24h a mistura 1/4-Pozolanas é 19 % maior que a 1/4-Cimento, mas que após 48 h as duas apresentaram praticamente a mesma elevação adiabática de temperatura.

Tabela 4.9: Resultados dos testes de elevação adiabática de temperatura

Bioconcreto	T (°C)	
	24 h	48 h
1/4-Pozolanas	47,9	56,3
1/4-Cimento	40,3	55,3

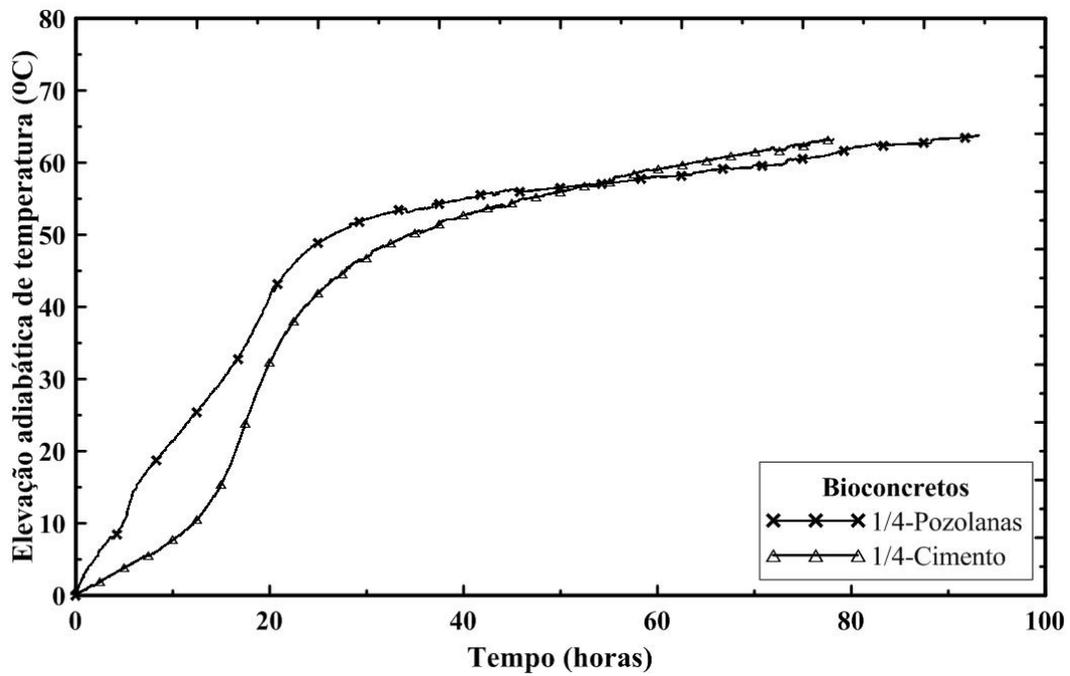


Figura 4.24: Elevação adiabática de temperatura em escala linear

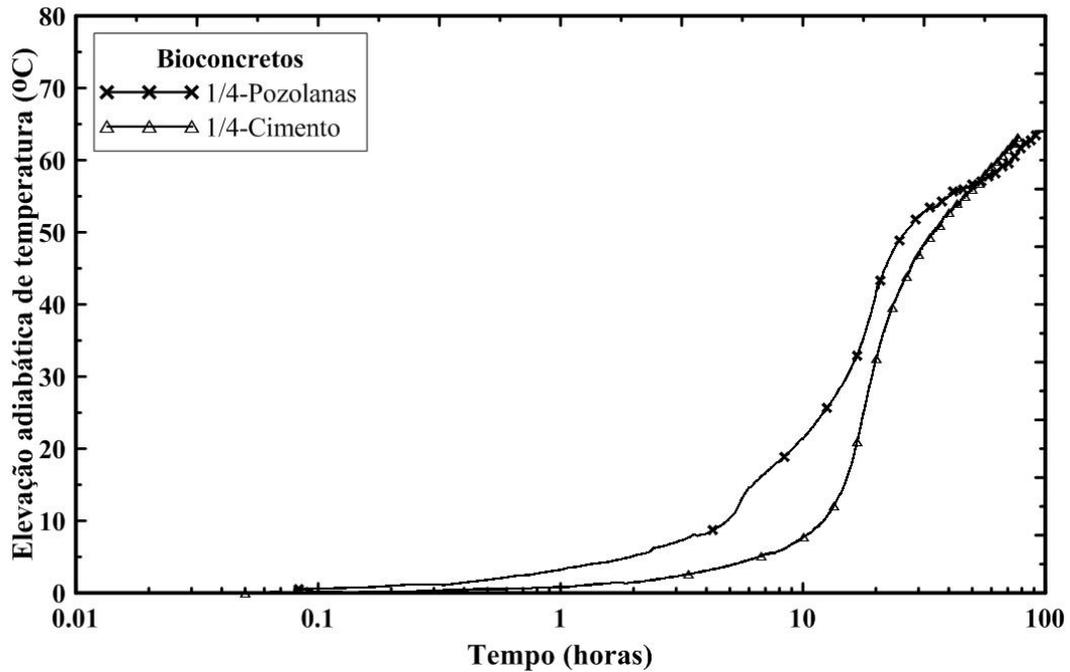


Figura 4.25: Elevação adiabática de temperatura em escala logarítmica

4.5.3 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 4.26 apresenta imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de partículas de serragem submetidas a três pré-tratamentos diferentes. A Figura 4.26.a é referente ao pré-tratamento com água pura utilizando m_s/m_a igual a 1/4 e a Figura 4.26.b é referente ao pré-tratamento com água e adição de Ca(OH)_2 . Analisando atentamente esta figura, percebeu-se a presença de vários pontos brancos na superfície da partícula, sendo esse um indício da fixação de Ca(OH)_2 nas partículas de serragem de madeira. A Figura 4.26.c é referente ao tratamento com CaCl_2 e também possui alguns pontos brancos em sua superfície que podem se tratar de CaCl_2 incrustado nas partículas.

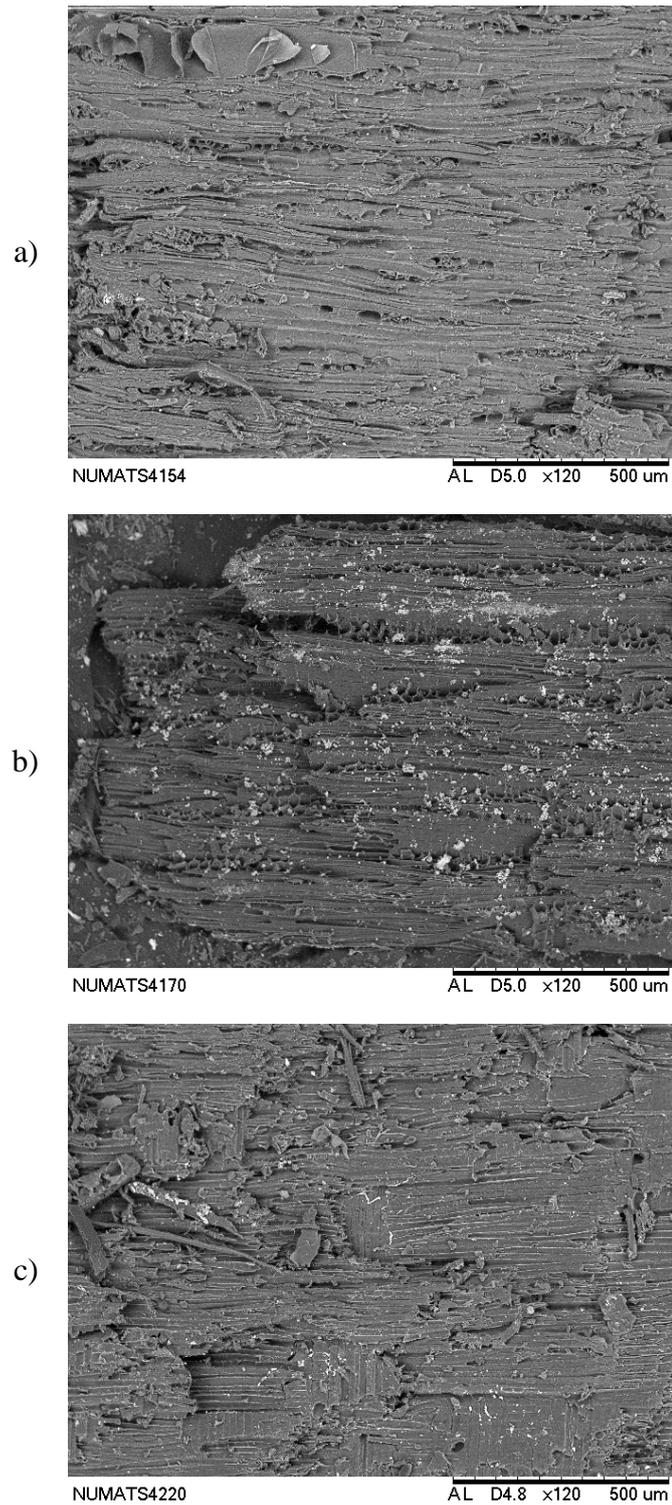


Figura 4.26: Imagens de MEV da superfície das partículas da serragem de madeira a) Serragem tratada com água b) Serragem tratada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ c) Serragem tratada com CaCl_2

EDS foi utilizado para comprovar a hipótese de incrustação de hidróxido de cálcio e de cloreto de cálcio na serragem de madeira, confirmando a presença deles na superfície das partículas, conforme Figura 4.27.

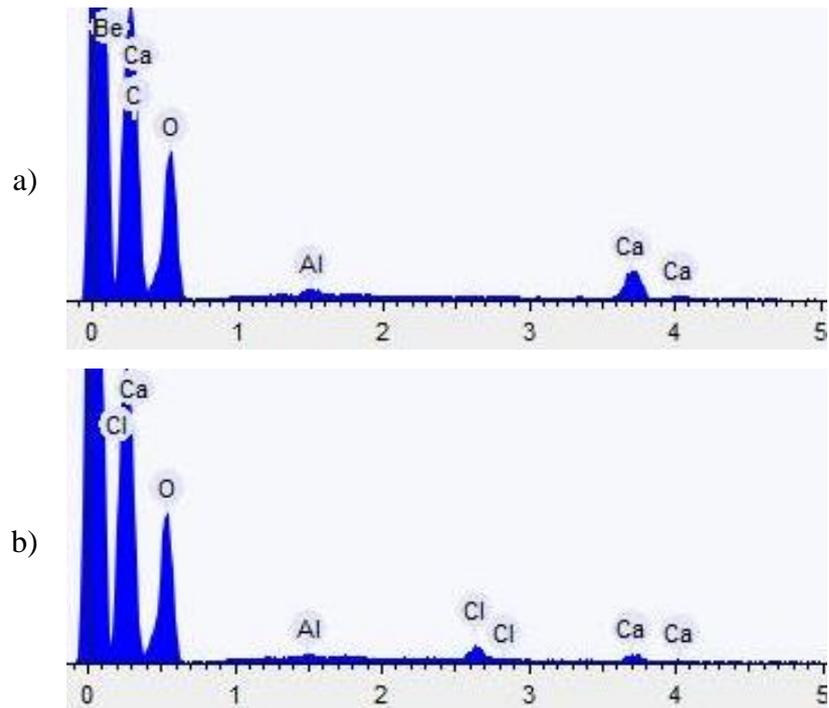
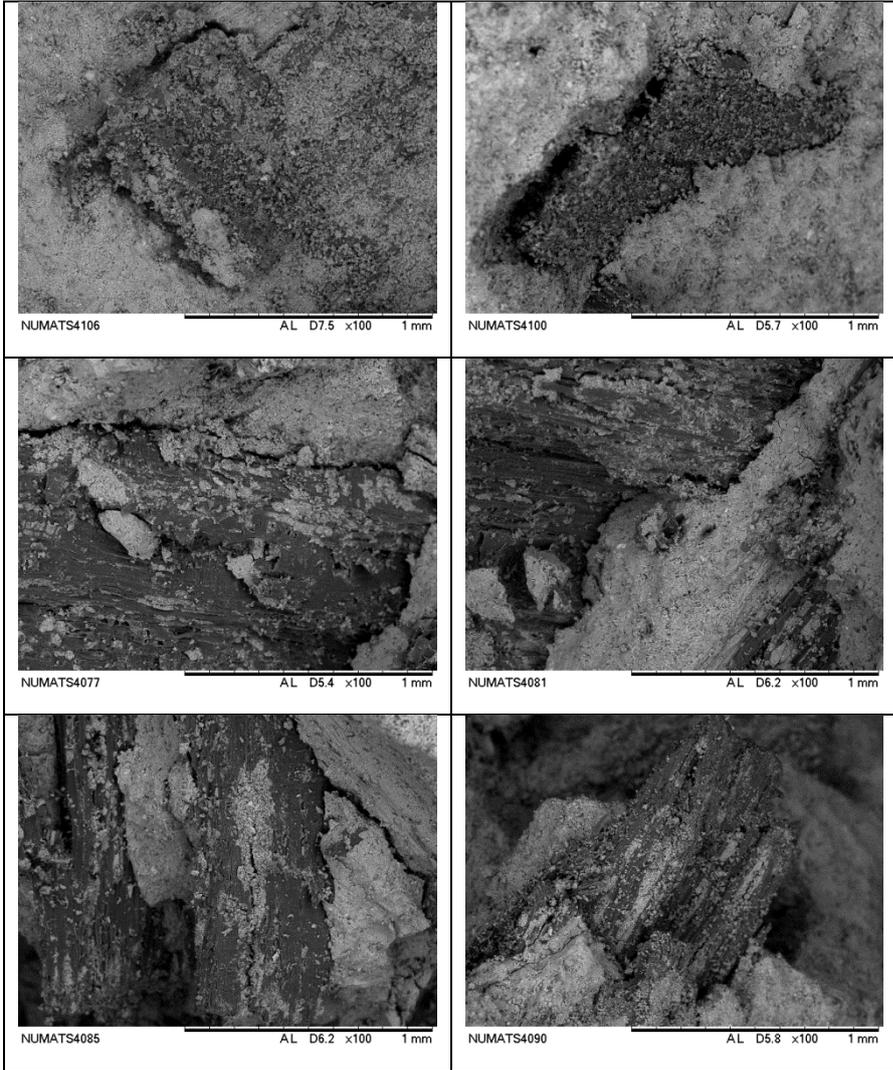


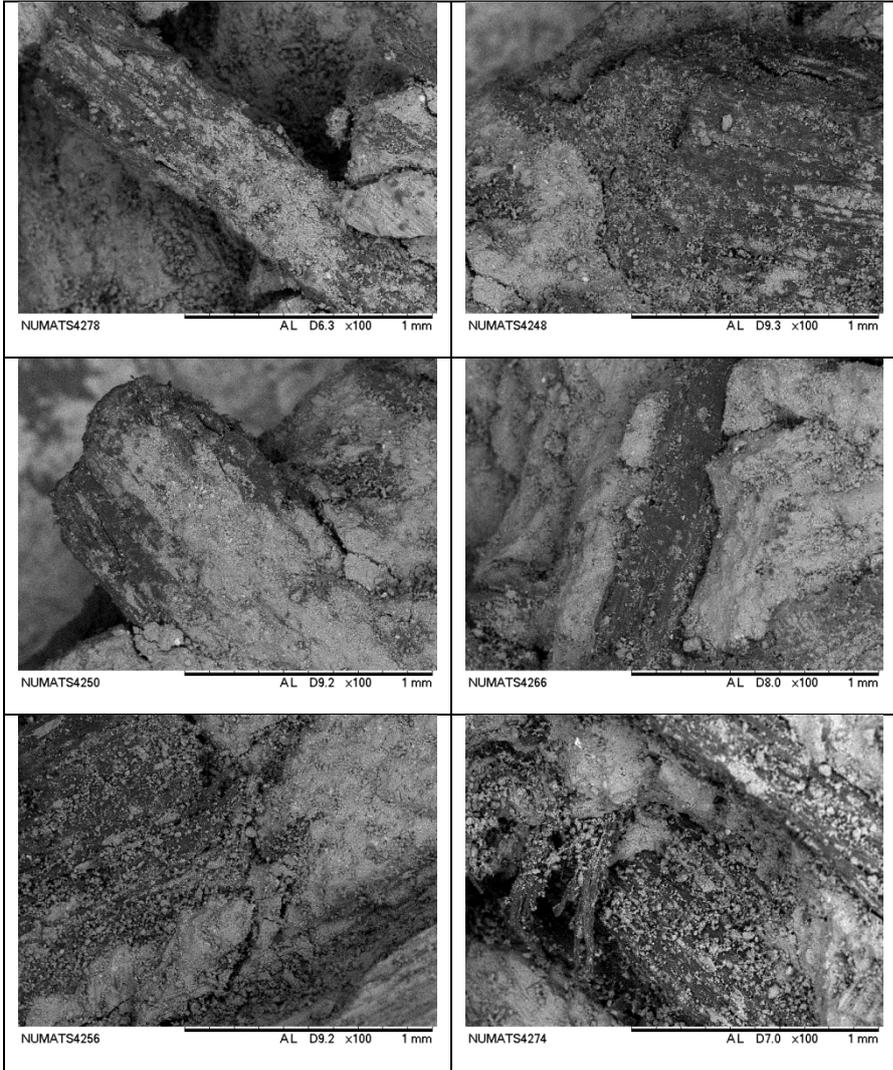
Figura 4.27: EDS a) Amostra tratada com Ca(OH)_2 b) Amostra tratada com CaCl_2

Imagens de MEV de bioconcretos produzidos com serragens com diferentes pré-tratamentos são apresentadas na Figura 4.28. Essas imagens foram feitas como tentativa de analisar a interface matriz – serragem de madeira. Observando as imagens das três amostras, percebeu-se que a partícula de serragem de madeira está bem envolta pela matriz, contendo inclusive pontos em sua superfície.

a)



b)



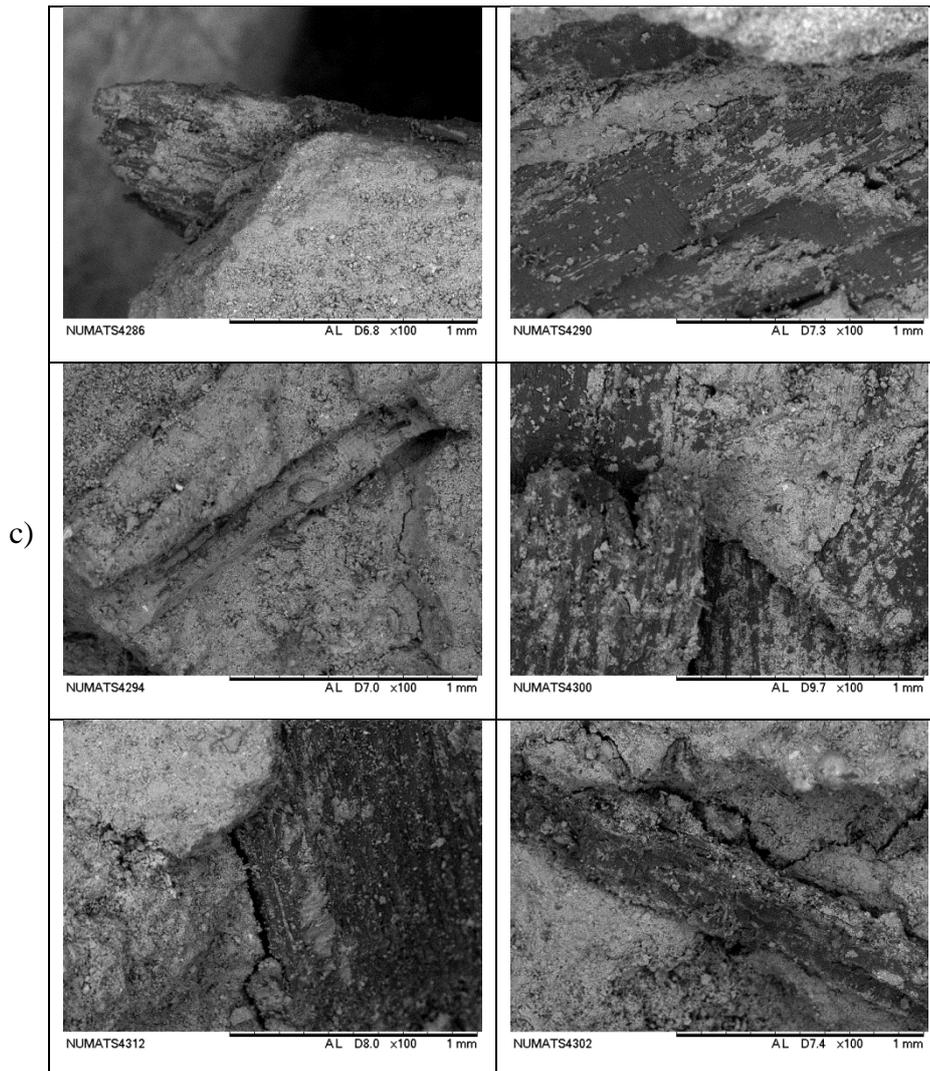


Figura 4.28: Imagens de MEV do bioconcreto a) Serragem tratada com água b) Serragem tratada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ c) Serragem tratada com CaCl_2

4.6 Análise do ciclo de vida

4.6.1 Avaliação do impacto ambiental

Para a avaliação do impacto ambiental foi utilizada a metodologia CML-IA, que é do tipo *midpoint*. Foi utilizada a categoria de impacto ambiental de potencial de aquecimento global para 100 anos (global warming potencial – GWP 100), em dióxido de carbono equivalente, expresso em $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ pela unidade funcional. Para a modelagem dos dados foi utilizado o *SimaPro* e planilha do Excel.

4.6.2 Interpretação dos resultados

Os resultados de consumo de água por m³ de bioconcreto produzido são apresentados na Figura 4.29. Observando este gráfico, percebeu-se que em um caso de escassez hídrica, o melhor cenário antes da normalização pelos dados de calorimetria isotérmica e pelos dados do UCA foi o que utilizou a lavagem com a razão biomassa:água de 1:4, sem nenhum aditivo químico. Porém, após a normalização, a lavagem com a razão biomassa:água de 1:4 com CaCl₂ foi melhor em ambos os casos. O reuso da água proporcionaria um menor consumo de água também, considerando este mesmo cenário.

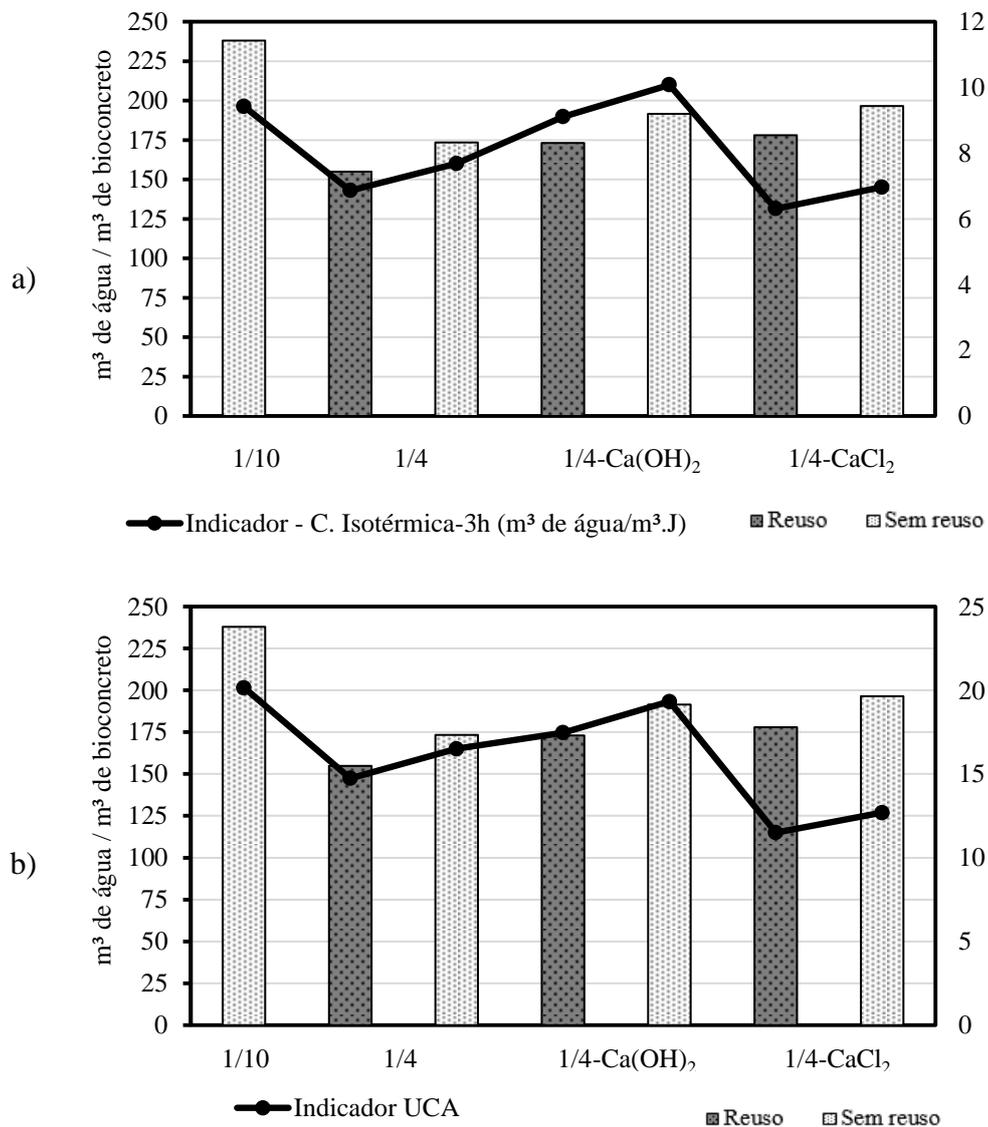


Figura 4.29: Consumo de água para bioconcretos de serragem a) Indicador calorimetria isotérmica b) Indicador UCA

O resultado de dióxido de carbono equivalente ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}$) por m^3 de bioconcreto está apresentado na Figura 4.30. Ao se normalizar a curva com os dados da calorimetria isotérmica e UCA, percebeu-se que o pior caso foi o que utilizou a lavagem com a razão biomassa:água de 1:4 em conjunto com solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o melhor foi o caso com 4 % de CaCl_2 e razão biomassa:água de 1:4. Neste último caso, a presença de cloreto de cálcio proporcionou melhores resultados na calorimetria isotérmica, diminuindo assim o impacto ambiental deste bioconcreto.

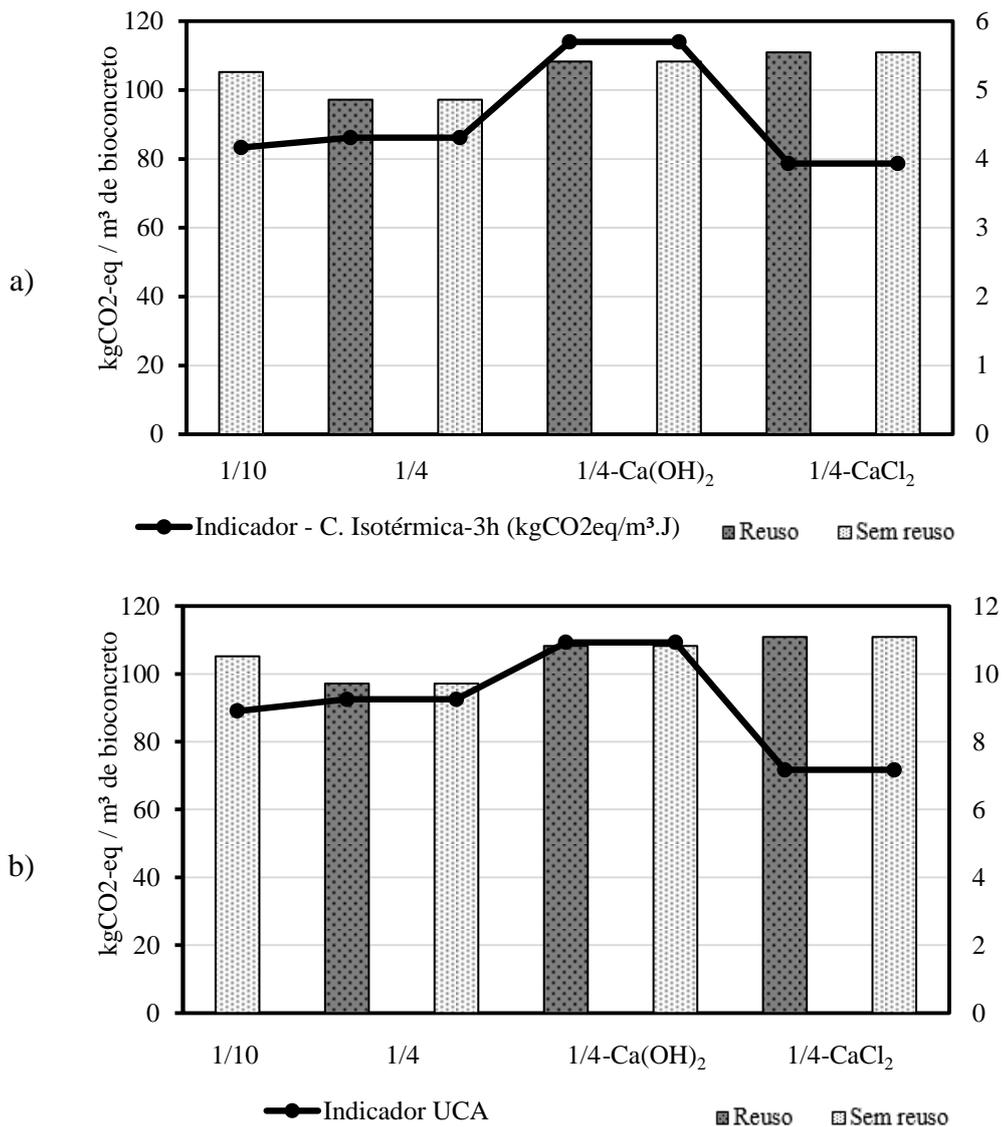


Figura 4.30: Mudanças climáticas a) Indicador calorimetria isotérmica b) Indicador UCA

5 Considerações finais

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A água aquecida solubiliza uma maior quantidade de extrativos, ao se comparar com a água em temperatura ambiente. O tempo de imersão influencia a solubilização dos extrativos somente até determinado ponto. As melhores combinações foram aquelas com temperatura de 80 °C ou acima.
- O aumento da razão m_s/m_a mostrou ser uma possibilidade viável, pois a quantidade de extrativos solubilizados aumentou praticamente na mesma proporção que a diminuição da quantidade de água. Assim, 1/4 mostrou-se uma possibilidade viável para a lavagem da biomassa de madeira.
- Tanto a osmose inversa como a nanofiltração se mostraram boas alternativas para o tratamento da água residual da lavagem permitindo o reuso da água na produção do bioconcreto.
- A calorimetria isotérmica mostrou que a osmose inversa foi o método de tratamento mais eficiente, pois o resultado de hidratação da pasta fabricada com ela praticamente coincidiu com o resultado da pasta fabricada com água deionizada.
- Os ensaios nos bioconcretos produzidos com partículas de serragem de madeira com diferentes pré-tratamentos mostraram que o melhor pré-tratamento foi o que utilizou razão biomassa:água de 1:4 em conjunto com 4 % de CaCl_2 .

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento desta pesquisa surgiram algumas proposições para futuras pesquisas, como:

- Identificar os compostos que neste trabalho foram denominados genericamente de extrativos retirados pela água ou pela solução aquosa na lavagem da serragem de madeira e identificar também aqueles que ficaram no permeado após a filtração no sistema de membranas.

- Estudar outras membranas para osmose inversa e nanofiltração como forma de escolher uma membrana mais eficiente para os tratamentos das mesmas águas residuais para tornar os processos mais eficientes e com um menor gasto energético, melhorando o cálculo da ACV.
- Avaliar a eficiência de cada um dos tratamentos através de ensaios mecânicos (compressão, flexão).

Referências Bibliográficas

ABREU, H. dos S. *et al.*, Métodos de análise em química da madeira. *Floresta e Ambiente* (2006): 01-20.

AL ROUSAN, T. M., 2004, *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. Tese de Doutorado, Texas AM University.

AMZIANE, S., SONEBI, M. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters* (2016) 1: 31-38.

ANDRADE JR., E. R., 2004, *Efeitos da Ozonização sobre a Remoção de Matéria Orgânica Natural de Águas Eutrofizadas*. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ANDREOLA, V. M., 2017, *Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

APHA, AWWA & WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington: 1999

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9939*: Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 14040*: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 14044*: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 46 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52*: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 53*: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 65*: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

BAKER, R. W., 2004, *Membrane Technology and Applications*. 2 ed. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England.

BÉLAFI-BAKÓ, K., GUBICZA, L., MULDER, M., 2000, *Integration of membrane processes into bioconversions*. Springer Science+Business Media New York.

BERALDO A. L., CARVALHO J. V. Compósito *Eucalyptus grandis* – cimento Portland. *Scientia Forestalis* 2004;65:150-161.

BERALDO, A. L., 2011, “Compuestos de biomasa vegetal y cemento”, Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, v. 1, pp. 301-326.

BERTOLINI, M. S., CAMPOS, C. I. de, SOUZA, A. M. de, *et al.*, 2014, Wood-cement composites from wastes of *Pinus* sp. wood: effect of particles treatment. *International Journal of Composite Materials*, 4(2), 146-149.

BOTOSO, P. C. *Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento*. Embrapa Florestas, Colombo : Embrapa Florestas, 2009.

BULLARD, J. W. *et al.* Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, n. 41, 2011. 1208-1223.

CALDAS, L., DA GLORIA, M., SANTOS, D., ANDREOLA, V. M., PEPE, M., TOLEDO FILHO, R., 2017. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. *2º International Conference on Bio-Based Building Materials & 1º Conference on Ecological Valorisation of Granular and Fibrous Materials*. Anais Clermont-Ferrand, França.

CALDAS, L., MENEZES, A. P. N., DA GLORIA, M. Y., ANDREOLA, V. M., SANTOS, D. J., TOLEDO FILHO, R. D., 2019. Carbon footprint and water scarcity

assessment of wood bio-concretes: Evaluation of different life cycle impact methods. *18^o International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies*. Anais Nairobi, Kenya.

CASTRO, V., ARAÚJO, R. D., PARCHEN, C., IWAKIRI, S., 2014, Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage no grau de compatibilidade com cimento Portland. *Revista Árvore*, 38(5), 935-942.

CONAMA. Resolução Nº "430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Ministério do Meio Ambiente*. Brasil (2011).

DA GLORIA, M. Y. R., 2015, *Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

DA SILVA, M. A., 2015, *Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos autoadensáveis de alto desempenho contendo seixo rolado de rio e fibras de aço*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

DIQUÉLOU, Y., GOURLAY, E., ARNAUD, L., KUREK, B.: Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement Concrete Composites*. 55, 112–121 (2015).

DONG Z., YU Y., SONG P., MA L., LU F. Effects of two types of waste wood species on the hydration characteristic of Portland cement. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2016;14:13-20.

EDWIN, Z. E.; HABERT, G.; LOPEZ MUÑOZ, L.F.; Environmental savings potential from the use of bahareque (mortar cement plastered bamboo) in Switzerland. *Key Engineering Materials*, 2014, 600, (21-33).

FAN, M., NDIKONTAR, M. K., ZHOU, X., NGAMVENG, J. N.: Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*. 36, 135–140 (2012).

- FARRUGIA, B. A eficiência das membranas de ultrafiltração. *Revista TAE*. n. 8, 2012.
- FARRUGIA, B. Membranas de osmose reversa: aplicações e novidades do mercado. *Revista TAE*. n. 15, 2013.
- FERREIRA, S. R., 2016, *Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- FINOTTI, A. R., SCHNEIDER, V. E., WANDER, P. R., HILLIG, É., SILVA, M. D’A. *Uso energético de resíduos de madeira na cadeia produtiva de madeira/móveis e possibilidades de geração de créditos de carbono*. In: Pólo Moveleiro da Serra Gaúcha - Sistemas de gerenciamento ambiental na indústria moveleira. Schneider, V. E., Nehme, M. C., Ben. F. Orgs. Educs, 2006, p. 191-230.
- FLORENTIN, Y., PEARLMUTTER, D. GIVONI, B., GAL, E., 2017, A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy Buildings*, 156, 293-305.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Global Forest Resources Assessment 2015*. 2 ed. Rome, 2016.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.
- FRYBORT, S., MAURITZ, R., TEICBHINGER, A., MÜLLER, U., 2008, *Cement bonded composites - a mechanical review*. *Bioresources* 3(2), 602–626.
- GHAVAMI, K., 1989, “Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering”. In: *Symposium Materials for Low Income Housing*, v. 3, pp. 526-536.
- HACHMI, M., MOSLEMI, A. A., 1989. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Products Journal* 39(6):55–58.
- HACHMI, M., MOSLEMI, A. A. e CAMPBELL, A. G., 1990, A new technique to classify the compatibility of wood with cement. *Wood Science and Technology*, 24, 345-354.

HARBERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., 2006, *Processos de separação por membranas*. Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ.

IPCC. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, v. 2- Energy.

IWAKIRI, S., SILVA, L. S. da, TRIANOSKI, R., *et al.*, 2012, Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira. *Cerne*;18(2):303-308.

IWAKIRI S., TRIANOSKI R., CUNHA A. B., *et al.*, 2015, Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. *Revista de Ciências Agroveterinárias*;14(3):217-223.

JANOTKA, I., PUERTAS, F., PALACIOS, M., *et al.*, 2010, Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 24, 791-802.

JORGE, F. C., PEREIRA, C., FERREIRA, J. M. F., 2004, Wood-cement composites: a review. *Holz Roh Werkst*. 62, 370-377.

JUENGER, M. C. G., JENNINGS, H. M., 2001, New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 32, 393-399.

KARADE, S. R., IRLE, M., MAHER, K., 2003, Assessment of wood-cement compatibility: a new approach. *Holzforschung* 57: 672-680.

KLOCK, U., ANDRADE, A. S. de. *Química da madeira*. Universidade Federal do Paraná. 4 ed. Curitiba, 2013.

LA ROSA, A. D.; RECCA, A.; SUMMERSCALES, J.; LATTERI, A.; *et al.*; Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 74, (135–144).

LATORRACA, J. V. D. F., 2000, *Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LIMA, A. M. de, 2005, *Influência de três tipos de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósitos cimento-madeira à base de resíduos de serraria*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará, Belém.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos do desdobro de toras de *pinus spp*, sílica ativa e cinza de casca de arroz em compósito cimento-madeira. *Scientia Forestalis*, 38(87):459-469, 2010.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S.; LOMELI-RAMIREZ, M. G. Utilização de resíduos de *pinus spp.*, metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira. *Madera y Bosques*, 17(2):47-65, 2011.

MAGNIONT, C., ESCADEILLAS, G. Chemical composition of bio-aggregates and their interactions with mineral binders. *Bio-aggregates Based Building Materials*, pp. 1-37, 2017.

MATOSKI, A., HARA, M. M., IWAKIRI, S., CASALI, J. M., 2013, Influence of accelerating admixtures in wood-cement panels: characteristics and properties, *Acta Scientiarum*, 35(4), 655-660.

MAZZANTI, Valentina, 2014, *Rheology of wood polymer composites*. Tesi Dottorato. Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria – Università degli Studi di Ferrara, Ferrara.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering – Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 2018 p.

MILLER, D. P., MOSLEMI, A. A. (1991a). Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength, *Forest Products Journal*, 41, 9-14.

MILLER, D. P., MOSLEMI, A. A. (1991b). Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength, *Wood Fibre Sci.*, 23, 472-482.

MORESCHI, J. C. *Propriedades da madeira*. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. 4 ed. Curitiba, 2014.

NA, B., WANG, Z., WANG, H., LU, X.: Wood-cement compatibility review. *Wood Research* 59(5), 813–826 (2014).

OKINO, E. Y. A., SOUZA, M. R. de, SANTANA, M. A. E., SOUZA, M. E. de, TEIXEIRA, D. E., 2004, Chapa aglomerada de cimento-madeira de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg.. *Revista Árvore*, 28(3), 451-457.

PEREIRA, H., GRAÇA, J., RODRIGUES, J. C.: Chapter 3. Wood chemistry in relation to quality. In: ROBERTS, J. A, USHERWOOD, P. N. R. *Wood Quality and its Biological Basis*. Blackwell Publishing Ltd, 2003. p. 53-86.

PEREIRA, C., JORGE, F. C., IRLE, M., FERREIRA, J. M., 2006, Characterizing of the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in Portugal I: temperature profiles and compatibility indices. *Journal of Wood Science*. 311-317.

PIMENTEL, L. L., 2000, *Telhas onduladas à base de cimento Portland e resíduos de Pinus caribaea*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

QUIROGA, A., MARZOCCHI, V., 2016: Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. *Composites Part B*. 84: 25-32.

RAMAGE, M. H., BURRIDGE, H., BUSSE-WICHER, M. *et al.*. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 333-359, 2017.

RECH, C. Estudo sugere uso de serragem como insumo. *Revista da Madeira*, Curitiba, n. 66, p. 30 – 34, 2002.

ROWELL, R. M., PETTERSEN, R., HAN, J. S., ROWELL, J. S., TSHABALALA, M. A.: Chapter 3. Cell wall chemistry. In: Rowel, R. M. (ed.). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. (2005).

RUBIM, C. Mercado de nanofiltração se expande, estimado globalmente em US\$ 813 milhões até 2023. *Revista TAE*. n. 49, 2019.

SANDERMANN, W., BRENDEL, M. (1956). "Die 'zementvergiftende' Wirkung von Holzinhaltstoffen und ihre Abhängigkeit von der chemischen Konstitution," Holz Roh Werkst. 14, 307-313. (In German)

SANTOS, R. C. dos, MENDES, L. M., MORI, F. A., MENDES, R. F., 2008: Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. *Cerne*. 14(3): 241-250.

SILVA, B. V. da, 2013, *Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia – Universidade de São Paulo, SP.

SILVA, J. G., 2005, *Análise do Ciclo de Vida de Tijolos Prensados de Escória de Alto Forno*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, ES.

SIQUEIRA, I. S. de, 2014, *Influência da adição de polpas celulósicas de pinho e eucalipto na hidratação e comportamento mecânico de pastas de cimento*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

SOROUSHIAN, P., HASSAN, M.: Evaluation of cement-bonded strawboard against alternative cement-based siding products. *Construction and Building Materials*. 34, 77–82 (2012).

SOUZA, A. A. C., 2006, *Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará, Belém.

THOMAS, Peter. *Trees: their natural history*. 2 ed. Cambridge, University Printing House, 2004.

TOLEDO FILHO, R. D., 1997, *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ.

TUOTO, M., 2009, *Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas*

técnicas para promover o seu uso adequado. Sumário Executivo, Projeto PNUD BRA 00/20 – Apoio às políticas públicas na área de gestão e controle ambiental – Ministério do Meio Ambiente, Curitiba.

VAICKELIONIS G, VAICKELIONIENE R. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. *Ceramics-Silikáty* 2006;50(2):115-122.

VITORINO, F. C., 2012, *Caracterização experimental de pastas cimentícias contendo polímero SBR em pó e microfibras de volastonita.* Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

VON SPERLING, Marcos. *Estudos de modelagem da qualidade da água de rios.* Belo Horizonte: UFMG, 2007. Vol. 7. 452 p.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.* 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 470 p.

WEI, Y. M, ZHOU, Y. G., TOMITA, B., 2000, *Hydration behavior of wood cement-based composite I: Evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary Portland cement.* J. Wood Science, 46: 296-302.

WOLFE, R. W., GJINOLLI, A., 1999, Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste, *Forest Products Journal*, v. 49, n. 2, pp. 24.

YUBA, A. N., 2001, *Cadeia produtiva de madeira serrada de eucalipto para a produção sustentável de habitações.* 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.