



ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO FOGO DO BIO-CONCRETO DE MADEIRA

Amanda Lorena Dantas de Aguiar

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 2020

ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO FOGO DO BIO-CONCRETO DE
MADEIRA

Amanda Lorena Dantas de Aguiar

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

Orientador: Prof. Romildo Dias Toledo Filho

Aprovada por: Prof. Romildo Dias Toledo Filho

Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales

Prof^a. Camila Aparecida Abelha Rocha

Prof^a. Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2020

Aguiar, Amanda Lorena Dantas de

Estabilidade térmica e reação ao fogo do bio-concreto de madeira/ Amanda Lorena Dantas de Aguiar. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XX, 95 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 86-95.

1. Bioconcreto de madeira. 2. Estabilidade térmica.
3. Reação ao fogo. I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*À minha mãe,
pelo amor e apoio incondicional.*

Agradecimentos

À Deus, pelo dom da vida e graças recebidas até hoje.

À minha mãe, pelo amor e apoio incondicional em todas as minhas decisões, por se dispor a ficar longe de mim em prol das realizações dos meus sonhos e se fazer sempre presente. Ao meu pai, *in memoriam*, que me ensinou a ser uma pessoa melhor e me faz querer transformar a saudade de sua presença em orgulho que ele sempre demonstrou por mim. À Nininha, minha mãe do coração, por ter me escolhido como filha e se dedicar tão bem à isso. Ao meu irmão Leonardo, que de tão dedicado ao trabalho e família, é minha fonte de inspiração e meu maior exemplo.

Aos Geni's e Aguiar's, famílias amadas que torcem por mim e vibram com cada conquista. À família Medeiros: Gabi, Ayrton, Nívia pela oportunidade de morar em sua casa no Rio de Janeiro por mais de um ano e, em especial, a Dona Neide por me tratar como uma filha com tanto mimo e carinho. Vocês fizeram desse sonho realidade.

Ao meu orientador, Romildo, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pela confiança depositada em mim e por mostrar-se disponível para ajudar sempre que necessário.

Ao Yassin, rei da madeira e grande amigo que fiz no Numats. Agradeço pela orientação contínua, ideias dadas, e resultados discutidos sempre com um sorriso enorme no rosto. À Mônica, por me receber no Numats com muito carinho, me ensinar tanto e dividir comigo além de toda sua biomassa muitos momentos alegres. Ao Giu, Bruno e Pedro pela amizade, parceria diária no laboratório, RU, lanches, cafés da tarde, além das saídas nos finais de semana. Obrigada por fazerem parte da minha vida e tornarem o Rio de Janeiro melhor para viver. À Nathália Andrade, pela alegria, risadas e pelo grande exemplo de determinação na pesquisa. Você é admirável! Ao time mais unido e competitivo do Numats quando se fala de biomassa: o bioconcreto. Yassin, Dani, Vanessa, Nathália e Carla é uma honra trabalhar junto a vocês e contar com um ambiente de colaboração absoluta. Aos queridos amigos Tamara, Carol G., Iolanda, Amanda, Victória, Yasmim, Juliano, Lucas e todos que contribuíram de alguma forma para meu crescimento e alegraram meus dias.

À minha grande amiga Amanda Campos, que desde o início do mestrado me atura, me hospeda na sua casa, me traz doce de leite de minas e é meu maior porto seguro no Rio, obrigada por tudo e por tanto. Aos amigos feitos no início do mestrado durante as disciplinas, aos que conheci durante o percurso e aos que até hoje se fazem presente na minha vida. Vocês foram muito importantes na minha trajetória.

Aos amigos de Natal, do CEFET, da UFRN e da vida por se fazerem presentes por mensagens e ligações e me darem força para concluir esta etapa.

A toda equipe NUMATS, especialmente Bruna, Adailton, Mauro, Marcelo, Carlos, Márcio, Flavinho, Luzi e Claudinha por toda a ajuda. Vocês foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao LATEF, em especial ao professor Alexandre Landesmann, por ter me permitido o uso do laboratório para a realização dos ensaios de fogo e Monique pela paciência e disponibilidade para explicar a metodologia do ensaio e acompanhar a realização de todos.

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.)

ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO FOGO DO BIO-CONCRETO DE MADEIRA

Amanda Lorena Dantas de Aguiar

Julho/2020

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Os bio-concretos de madeira (BCM) apresentam-se como uma solução para o avanço da construção sustentável, uma vez que permitem a reutilização da serragem gerada no processamento da madeira e estocam carbono biogênico no seu interior. Entretanto, pouco se conhece sobre o comportamento deste material sob altas temperaturas e sua reação ao fogo. Este trabalho tem por objetivo avaliar a estabilidade térmica dos BCMs ao se submeter os mesmos a temperaturas que variaram de 22 °C até 250 °C, bem como avaliar suas propriedades de reação ao fogo. Ensaio de densidade, resistência à compressão uniaxial e microscopia eletrônica de varredura foram realizados em BCMs com teores de biomassa de 40, 50 e 60%, antes e após a submissão das amostras às elevadas temperaturas. Ensaio de condutividade térmica foram realizados nas mesmas misturas apenas a temperatura ambiente. Tratamentos alcalino e térmico foram estudados na biomassa para garantir o ganho de resistência dos bio-concretos com o tempo, tendo a imersão da biomassa em solução de Ca(OH)_2 em dois ciclos se mostrado mais eficiente. O cone calorímetro de perda de massa foi utilizado para a análise das propriedades de combustão e reação ao fogo do BCM com teores de biomassa variando de 40 a 70%. A condutividade térmica, densidade e resistência à compressão do bio-concreto diminuíram gradualmente com o aumento do teor de biomassa. Até a temperatura de 200 °C foram observadas reduções de resistência e densidades inferiores a 19% e 13% respectivamente. Aos 250 °C as reduções nas propriedades mecânicas atingiram 87%. Apesar de se utilizar frações volumétricas de biomassa de até 70%, os bio-concretos não apresentaram ignição.

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

THERMAL STABILITY AND REACTION TO FIRE OF THE WOOD BIOCONCRETE

Amanda Lorena Dantas de Aguiar

July/2020

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

Wood bioconcretes (WBC) are presented as a solution for the advancement of sustainable construction, since they allow the reuse of waste generated in the wood processing and store biogenic carbon inside. However, the behavior of this material under high temperatures and its reaction to fire properties are barely known. This work aims to evaluate the thermal stability of WBCs and to submit them to temperatures ranging from 22 °C to 250 °C, as well as to evaluate their reaction to fire properties. Density, compressive strength and scanning electron microscopy tests were performed in WBCs with biomass contents of 40, 50 and 60%, before and after submitting the variables to high temperatures. Thermal conductivity tests were performed on the same mixtures only at room temperature. Alkaline and thermal treatments were studied in the biomass to guarantee the resistance gain of the bioconcrete over time, with the immersion of the biomass in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution in two cycles being more efficient. The mass loss cone calorimeter was used to analyze the combustion and fire reaction properties of WBC with biomass contents ranging from 40 to 70%. The thermal conductivity, density and compressive strength of bioconcrete gradually decreased with an increase in the biomass content. Up to 200 °C, reductions in strength and densities of less than 19% and 13%, respectively, were observed. At 250 °C, reductions in mechanical properties reached 87%. Despite using up to 70% volumetric biomass fractions, bioconcretes did not present ignition.

Sumário

| | |
|--|----|
| Agradecimentos | v |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 3 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.2 Estrutura da dissertação | 3 |
| 2 Revisão bibliográfica | 5 |
| 2.1 A madeira | 5 |
| 2.1.1 Estrutura da árvore | 5 |
| 2.1.2 Classificação da madeira | 6 |
| 2.1.3 Composição química da madeira | 7 |
| 2.1.4 Degradação térmica da madeira | 9 |
| 2.1.5 Características de desempenho ao fogo da madeira | 11 |
| 2.2 Bio-concretos | 13 |
| 2.2.1 Matriz cimentícia e pozolânica | 13 |
| 2.2.2 Interação entre bio-agregado e cimento | 14 |
| 2.2.3 Tratamentos corretivos | 15 |
| 2.3 Estabilidade térmica de concretos e bio-concretos | 16 |
| 2.4 Reação ao fogo de concretos e bio-concretos | 18 |
| 2.5 Conclusões da revisão bibliográfica | 21 |
| 3 Materiais e Metodologia Experimental | 22 |
| 3.1 Materiais utilizados | 23 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.1 | Serragem de madeira | 23 |
| 3.1.2 | Materiais Cimentícios..... | 26 |
| 3.1.3 | Aditivo químico..... | 26 |
| 3.1.4 | Água | 27 |
| 3.2 | Métodos de caracterização dos materiais..... | 27 |
| 3.2.1 | Serragem de madeira | 27 |
| 3.2.2 | Materiais cimentícios..... | 30 |
| 3.2.3 | Pasta de cimento e pozolanas | 30 |
| 3.3 | Pré-tratamento da serragem de madeira..... | 31 |
| 3.4 | Produção do bio-concreto | 32 |
| 3.4.1 | Compensação de água | 32 |
| 3.4.2 | Dosagem do bio-concreto..... | 32 |
| 3.4.3 | Processo de produção | 33 |
| 3.5 | Caracterização dos bio-concretos | 34 |
| 3.5.1 | Espalhamento e massa específica aparente | 34 |
| 3.5.2 | Condutividade térmica..... | 34 |
| 3.6 | Estabilidade térmica do bio-concreto de madeira..... | 35 |
| 3.6.1 | Propriedade física | 37 |
| 3.6.2 | Comportamento tensão x deformação | 37 |
| 3.6.3 | Microestrutura | 38 |
| 3.7 | Reação ao fogo do bio-agregado e bio-concreto de madeira..... | 39 |
| 3.7.1 | Cone Calorímetro de Perda de Massa (CCPM)..... | 39 |
| 3.7.2 | Metodologia de ensaio..... | 41 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | Resultados e discussões | 44 |
| 4.1 | Caracterização dos materiais | 44 |
| 4.1.1 | Serragem de madeira | 44 |
| 4.1.2 | Materiais cimentícios..... | 46 |
| 4.2 | Pré-tratamento da serragem de madeira..... | 48 |
| 4.3 | Caracterização dos bio-concretos de madeira..... | 52 |
| 4.3.1 | Espalhamento e massa específica aparente | 52 |
| 4.3.2 | Condutividade térmica..... | 54 |
| 4.4 | Estabilidade térmica do bio-concreto de madeira..... | 55 |
| 4.4.1 | Propriedade física | 55 |
| 4.4.2 | Comportamento tensão x deformação | 57 |
| 4.4.3 | Análise microestrutural..... | 67 |
| 4.5 | Reação ao fogo do bio-concreto de madeira..... | 72 |
| 4.5.1 | Taxa de liberação de calor | 74 |
| 4.5.2 | Calor efetivo de combustão | 79 |
| 4.5.3 | Perda de massa | 80 |
| 4.5.4 | Tempo e temperatura de ignição | 83 |
| 5 | Considerações finais | 84 |
| 5.1 | Conclusões | 84 |
| 5.2 | Sugestões para trabalhos futuros..... | 85 |
| | Referências Bibliográficas..... | 86 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1- Seção transversal de um tronco de árvore da espécie <i>Quercus alba</i> | 6 |
| Figura 2.2- Classificação da madeira (a) Forma geral de coníferas (b) Forma geral de dicotiledôneas (c) Seção transversal da <i>Pseudotsuga mensiezii</i> (conífera) (d) Seção transversal da <i>Betula allegheniensis</i> (dicotiledônea)..... | 7 |
| Figura 2.3- Interação entre polímeros da parede celular de madeira dura | 9 |
| Figura 2.4- Seção carbonizada da madeira..... | 12 |
| Figura 3.1- Programa experimental da pesquisa | 23 |
| Figura 3.2- Peneirador mecânico com peneira de malha de 1,18 mm..... | 25 |
| Figura 3.3- Partículas de bio-agregados resultantes da separação na peneira de malha de 1,18 mm (a) Partículas retidas; (b) Partículas passantes | 25 |
| Figura 3.4- Homogeneização do tipo pilha alongada utilizado para os bio-agregados (a) Espalhamento do material em pilha; (b) Pilha alongada após homogeneização..... | 26 |
| Figura 3.5 - Frascos com amostras do bio-agregado para determinação da massa específica | 27 |
| Figura 3.6- Determinação da composição química da madeira (a) Retirada de extrativos (b) Quantificação da lignina (c) Quantificação da celulose | 29 |
| Figura 3.7- Métodos de tratamento da serragem de madeira. (a) Tratamento térmico em água a 80 °C (b) Tratamento alcalino em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (c) Disposição da serragem para secagem..... | 32 |
| Figura 3.8- Ensaio de condutividade térmica (a) Ensaio em andamento (b) Marcação dos pontos de leitura nos corpos de prova | 35 |
| Figura 3.9- Esquema do programa experimental de estabilidade térmica do bio-concreto | 36 |
| Figura 3.10- Curva de aquecimento | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.11- Ensaio de compressão uniaxial do bio-concreto de madeira | 38 |
| Figura 3.12- Cone Calorímetro e unidade de controle | 40 |
| Figura 3.13- Esquema geral do ensaio no CCPM de orientação horizontal..... | 41 |
| Figura 3.14- Amostras para ensaio do cone calorímetro (a) serragem de madeira (b) bio-concreto | 41 |
| Figura 3.15- Uso de dessecadores para evitar ganho de umidade no bio-concreto..... | 42 |
| Figura 3.16- Ensaio de reação ao fogo do bio-concreto de madeira | 43 |
| Figura 4.1- Análise termogravimétrica da serragem de madeira (a) em atmosfera de gás nitrogênio (Pirólise) (b) em atmosfera de ar (Termólise)..... | 46 |
| Figura 4.2- Curvas granulométricas dos materiais cimentícios..... | 47 |
| Figura 4.3- Análise termogravimétrica da pasta de cimento e pozolanas | 48 |
| Figura 4.4-Curvas tensão x deformação para diferentes tratamentos de serragem (a) 7 dias (b) 28 dias | 49 |
| Figura 4.5- Superfície da serragem de madeira com diferentes tratamentos obtidas por MEV (a) TERM-80 (b) ALC-1IMER (c) ALC-2IMER..... | 51 |
| Figura 4.6 - EDS da serragem de madeira tratada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 51 |
| Figura 4.7- Espalhamentos obtidos para as misturas de bio-concreto (a) 40% de serragem (b) 50% de serragem (c) 60% de serragem..... | 53 |
| Figura 4.8- Condutividade térmica dos bio-concretos em função da densidade..... | 54 |
| Figura 4.9- Gráfico de densidade do bio-concreto com a evolução da temperatura | 56 |
| Figura 4.10- MEV de amostra de BCM60 submetido à 250 °C (a) estrutura porosa (b) detalhe da degradação da serragem de madeira | 57 |
| Figura 4.11- Curvas típicas de tensão versus deformação dos bio-concretos a temperatura ambiente | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.12- Curvas típicas da evolução de tensão versus deformação para diferentes temperaturas (a) BCM40 (b) BCM50 (c) BCM60 | 59 |
| Figura 4.13- Evolução da resistência à compressão com o aumento da temperatura dos bio-concretos | 60 |
| Figura 4.14- Evolução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura dos bio-concretos | 62 |
| Figura 4.15 - Curva esquemática do comportamento tensão versus deformação do bio-concreto | 63 |
| Figura 4.16- Índices de tenacidade em função da temperatura dos bio-concretos (a) BCM40 (b) BCM50 (c) BCM60 | 65 |
| Figura 4.17- Modos de fratura do bio-concreto de madeira à 22, 100, 150, 200 e 250 °C (a) BCM40 (b) BCM50 (c) BCM60 | 67 |
| Figura 4.18- Bio-concreto de madeira em temperatura ambiente (a) BCM40 (b) BCM50 | 68 |
| Figura 4.19- Bio-concreto de madeira à 100 °C (a) BCM40 (b) BCM50 | 68 |
| Figura 4.20- Bio-concreto de madeira à 150 °C e 200 °C (a) BCM40 (b) BCM50..... | 69 |
| Figura 4.21- Bio-concreto de madeira à 250 °C (a) BCM40 (b) BCM50 | 70 |
| Figura 4.22- Detalhes das fibras da madeira à (a) 22 °C (b) 100 °C (c) 150 °C (d) 200 °C (e) 250 °C..... | 72 |
| Figura 4.23- Imagens das amostras de serragem e bio-concretos antes e após os ensaios | 74 |
| Figura 4.24- Curva típica de HRR da serragem de madeira..... | 75 |
| Figura 4.25- Curvas típicas de HRR dos bio-concretos | 77 |
| Figura 4.26- Curvas (a) MHRR e (b) THR em função do teor de biomassa..... | 78 |
| Figura 4.27- Evolução da temperatura durante o ensaio | 79 |
| Figura 4.28- Curva EHC em função do teor de biomassa | 80 |

Figura 4.29-Curvas (a) TML e (b) MLR em função do teor de biomassa 81

Figura 4.30- Camada de carbonização dos bio-concretos 82

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1- Classificação das espécies que compõem a mistura do bio-agregado..... | 24 |
| Tabela 3.2- Dosagem do bio-concreto de madeira (kg/m ³)..... | 33 |
| Tabela 4.1- Valores de massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade referentes ao bio-agregado de madeira. | 44 |
| Tabela 4.2- Composição química do bio-agregado de madeira | 45 |
| Tabela 4.3- Composição química por FRX e massa específica dos materiais cimentícios | 47 |
| Tabela 4.4- Resistência mecânica do bio-concreto com diferentes tratamentos de serragem, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses) | 49 |
| Tabela 4.5- Massa específica aparente dos bio-concretos, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)..... | 53 |
| Tabela 4.6- Condutividade térmica dos bio-concretos de madeira, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses) | 54 |
| Tabela 4.7- Valores de massa específica aparente do bio-concreto (em g/cm ³) após submissão a diferentes temperaturas, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses) | 56 |
| Tabela 4.8- Valores médios de resistência à compressão dos bio-concretos (MPa), com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)..... | 60 |
| Tabela 4.9- Valores médios de módulo de elasticidade dos bio-concretos (GPa), com os coeficientes de variação (em % entre parênteses) | 61 |
| Tabela 4.10 - Tenacidade e deformação na primeira fissura e no pico das curvas típicas dos bio-concretos..... | 64 |
| Tabela 4.11- Propriedades de combustão da serragem e bio-concretos de madeira, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses) | 73 |

| | |
|---|----|
| Tabela 4.12- Espessura média de carbonização dos bio-concretos com coeficientes de variação (% entre parênteses)..... | 83 |
|---|----|

Lista de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1- Composição química da madeira | 8 |
| Quadro 2.2- Fases de degradação da madeira | 10 |
| Quadro 2.3- Principais características de reação ao fogo do Euroclass para produtos de construção segundo a EN 13501-2007 | 19 |

Lista de Símbolos

| | |
|-----------|---|
| A | Absorção de água |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ALC-1IMER | Tratamento alcalino com 1 ciclo de imersão |
| ALC-2IMER | Tratamento alcalino com 2 ciclos de imersão |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BCM | Bio-concreto de madeira |
| CCPM | Cone Calorímetro de Perda de Massa |
| COPPE | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia |
| CP V ARI | Cimento Portland de alta resistência inicial |
| C-S-H | Silicato de cálcio hidratado |
| DTG | Derivada da perda de massa |
| E | Módulo de elasticidade |
| EDS | Espectroscopia por energia dispersiva |
| EHC | Calor efetivo de combustão |
| F_c | Resistência à compressão |
| FRX | Fluorescência de Raios X |
| HRR | Taxa de liberação de calor |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| IT | Índice de tenacidade |
| LABEST | Laboratório de Estruturas e Materiais |
| LVDT | <i>Linear Variable Differential Transformer</i> |
| MEV | Microscopia eletrônica de varredura |
| MHRR | Média da taxa de liberação de calor |
| MLR | Taxa de perda de massa |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| NUMATS | Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável |
| PHRR | Pico da taxa de liberação de calor |
| TERM-80 | Tratamento térmico à 80 °C |
| TG | Termogravimetria |

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| THR | Calor total liberado |
| TIG | Temperatura de ignição |
| TML | Massa total perdida |
| T_{pf} | Tenacidade de primeira fissura |
| T_{pico} | Tenacidade de pico |
| TTI | Tempo de ignição |
| U | Teor de umidade |
| WBC | <i>Wood bioconcrete</i> |
| ϵ_{pf} | Deformação de primeira fissura |
| ϵ_{pico} | Deformação de pico |
| γ_a | Massa específica aparente |

1 Introdução

O uso da madeira como material de construção, não apenas em aplicações estruturais, tem sido objeto de interesse da indústria da construção civil a muitos anos. Existe uma grande variedade de espécies de madeira disponíveis no mercado com elevado potencial para utilização em estruturas, revestimentos internos, pisos e móveis.

O Brasil tem um alto potencial agrícola e florestal. Florestas exóticas como *Pinus* e *Eucalyptus* se adaptaram bem às condições climáticas tropicais e subtropicais, características do território brasileiro, principalmente devido às avançadas tecnologias de florestamento (VALVERDE *et al.*, 2005). Com a crescente produção de madeira serrada, as indústrias madeireiras têm gerado uma grande quantidade de resíduos, que podem ser incorporados em matrizes para fabricação de compensados, vigas laminadas, chapas de partículas e painéis cimento-madeira (DA GLORIA, 2015). Painéis de cimento-madeira podem oferecer várias características vantajosas, como reduzir custos e reutilização de resíduos, melhorar o desempenho térmico de painéis de concreto convencionais e, ao mesmo tempo, preservar suas qualidades mecânicas (BEDERINA *et al.*, 2007).

Diversos pesquisadores têm desenvolvido compósitos cimento – biomassa vegetal (bambu, cânhamo, casca de arroz, madeira) leves com o intuito de aumentar a eficiência energética do material (ANDREOLA, 2017; SANTOS, 2020; DIQUÉLOU *et al.*, 2015; DA GLORIA, 2015; PARCHEN, 2013). Nesse contexto, a utilização de resíduos de madeira na produção de bio-concretos mostra ter elevado potencial para o desenvolvimento da construção civil sustentável, uma vez que este material, além de possuir baixa densidade, apresenta propriedades de isolamento térmico. Além disso, o uso de biomassa vegetal vem atraindo atenção como forma de reduzir as emissões de CO₂, uma vez que armazenam carbono biogênico absorvido em uma árvore durante seu crescimento (CALDAS, 2020).

Uma preocupação no desenvolvimento de bio-concretos de madeira leves, com elevados teores de biomassa, é como este material se comporta quando submetido a altas temperaturas ou em condições de incêndio. Pesquisas no âmbito de reação ao fogo da madeira ou comportamento do concreto a altas temperaturas mostram o desempenho individual destes materiais (ROCHA, 2014; XU *et al.*, 2015; FERNANDES *et al.*, 2017).

Alterações nas propriedades físicas e químicas do concreto ocorrem, devido à elevação da temperatura, e podem resultar em redução das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e módulo de elasticidade, fissuras e deslocamento afetando a capacidade resistente dos elementos e a estabilidade global do sistema estrutural (HAGER, 2013). Segundo Fingerloos (2007), a natureza e a microestrutura do agregado afetam a estabilidade e a condutividade térmica do concreto, alterando a resistência residual. Em se tratando de bio-agregados de madeira, sua decomposição térmica ocorre a partir dos 180 °C até aproximadamente 500 °C, onde o resíduo principal é o carvão (FIGUEROA & DE MORAES, 2009).

O concreto é um material incombustível e, portanto, mesmo sob elevado fluxo de calor não apresenta ignição, mostrando que a contribuição deste material para um incêndio é nula (PUENTE *et al.*, 2016). Por outro lado, quando exposta ao fogo, a madeira sofre degradação térmica, incluindo diferentes processos termofísicos e termoquímicos como transferência de calor, secagem, pirólise, carbonização, perda de massa e combustão lenta, onde a morfologia e composição química da madeira afetam fortemente todos esses processos (FRIQUIN, 2011).

A literatura apresenta o comportamento térmico e ao fogo do concreto convencional e da madeira de forma isolada. Entretanto, na literatura disponível não se encontrou nenhum artigo científico que trata de estudos destas propriedades em bio-concretos de madeira. Portanto, como forma de preencher esta lacuna, este trabalho propõe o estudo da estabilidade térmica e reação ao fogo de bio-concretos de madeira com elevados teores de biomassa em sua composição.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento físico, mecânico e microestrutural de bio-concretos de madeira quando submetidos a altas temperaturas, e suas propriedades de reação ao fogo.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Estudar a degradação térmica da serragem da madeira, composta pelas espécies Angelim pedra, Cedro, Cedrinho e Maçaranduba, para definição das temperaturas a serem estudadas;
- Analisar a influência do teor de biomassa e da temperatura no comportamento físico e mecânico de diferentes bio-concretos de madeira;
- Avaliar a influência do teor de biomassa nas propriedades de reação ao fogo do bio-concreto.

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por cinco capítulos.

Capítulo 1: Introdução ao tema abordado, apresentando uma contextualização da pesquisa assim como a motivação para o seu desenvolvimento, exposição dos objetivos do estudo e estrutura do trabalho.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre a madeira através de sua composição química, degradação térmica e características de desempenho ao fogo, bem como sobre bio-concretos de biomassa vegetal e matriz cimentícia e a interação entre eles. Inclui também uma revisão sobre estabilidade térmica e reação ao fogo de compósitos de cimento.

Capítulo 3: Apresentação do plano experimental, contendo a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, bem como a metodologia empregada nos ensaios de caracterização

dos materiais e nos ensaios para a determinação da estabilidade térmica e propriedades de reação ao fogo dos bio-concretos estudados.

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

Capítulo 5: Principais conclusões do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 A madeira

A madeira é uma estrutura biológica complexa, com muitos tipos de células agindo em conjunto para servir às necessidades de uma planta viva. Condução de água das raízes para as folhas, suporte mecânico do corpo da planta e armazenamento de compostos bioquímicos são as principais funções deste material para uma árvore (WIEDENHOEFT, 2010).

Por se tratar de um material heterogêneo, as variações físicas e anatômicas da madeira são grandes entre espécies distintas ou até mesmo dentro da mesma espécie, principalmente devido à idade e fatores genéticos e ambientais (BODIG & JAYNE, 1993).

Ao entender a função da madeira na árvore viva, podemos entender melhor os pontos fortes e limitações que ela apresenta como material. Um cientista que entende as inter-relações entre forma e função pode prever a utilidade de uma madeira específica em um novo contexto (WIEDENHOEFT, 2010).

2.1.1 Estrutura da árvore

Wiedenhoeft (2010) define a estrutura biológica de uma árvore viva em dois domínios principais: o corpo e as raízes. As raízes são estruturas subterrâneas responsáveis pela absorção de água e nutrientes minerais, ancoragem mecânica do corpo da árvore e armazenamento de bioquímicos. O corpo da árvore, por sua vez, é composto pelo tronco, ramos e folhas.

O tronco da árvore é composto de vários materiais presentes em camadas concêntricas. A casca é uma camada externa à prova d'água que envolve e protege o floema. O floema é o tecido vivo responsável por transportar água, sais minerais e compostos orgânicos das folhas para o restante da árvore. O câmbio é uma camada fina de tecido celular vivo responsável pelo crescimento dos anéis, tornando o tronco mais espesso. O alburno, camada de cor clara, é constituído por células com função de transportar água e seiva bruta das raízes para as folhas. O cerne, geralmente de cor escura, é o maior responsável

pelo suporte da árvore. Por fim, a medula é o tecido mole e esponjoso, remanescente do broto, presente no centro das árvores (THOMAS, 2004).

A Figura 2.1 ilustra a visão macroscópica da seção transversal do tronco de uma árvore da espécie *Quercus alba*, onde podem ser vistas as camadas acima explicitadas.

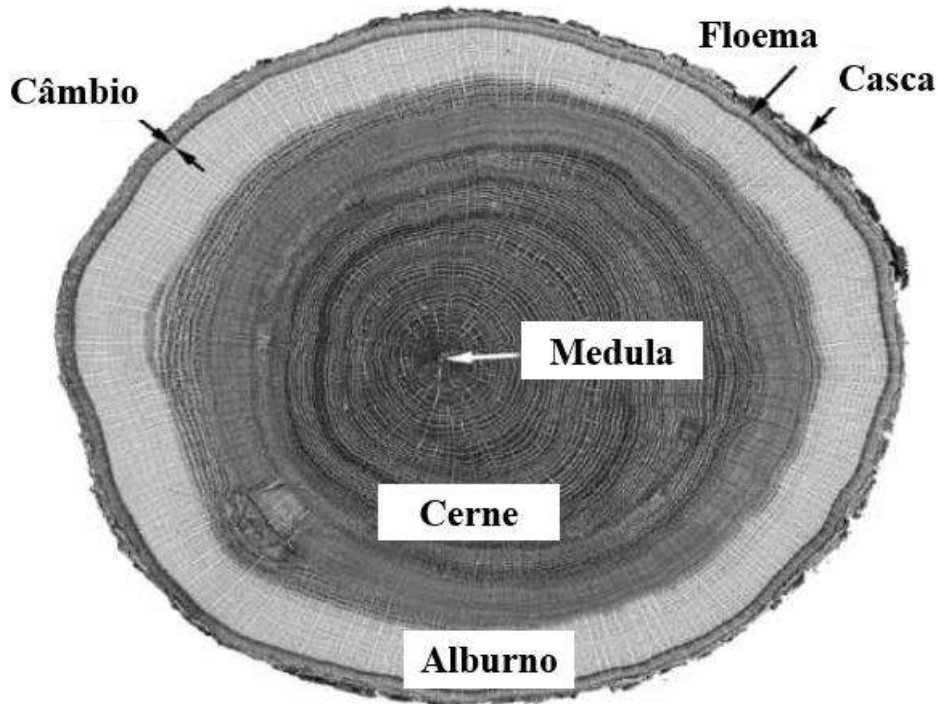


Figura 2.1- Seção transversal de um tronco de árvore da espécie *Quercus alba*

(Adaptado de WIEDENHOEFT, 2010)

2.1.2 Classificação da madeira

De maneira geral, a madeira pode ser classificada em dois grandes grupos: macia (*softwood*) e dura (*hardwood*).

Botanicamente, as árvores das quais são obtidas as madeiras duras são classificadas como angiospermas ou dicotiledôneas. Anatomicamente, este tipo de madeira é porosa pois apresenta elementos de vaso, que são células da madeira com extremidades abertas e que juntas formam tubos contínuos que servem como canal para transporte de água e seiva na árvore. Geralmente as árvores de madeira dura apresentam folhas largas. As madeiras macias, por sua vez, provêm de árvores do tipo gimnosperma ou coníferas, que

apresentam forma de cone e folhas em formato de agulhas ou escamas, e não exibem estrutura porosa (WIEMANN, 2010). A Figura 2.2 ilustra as características supracitadas.

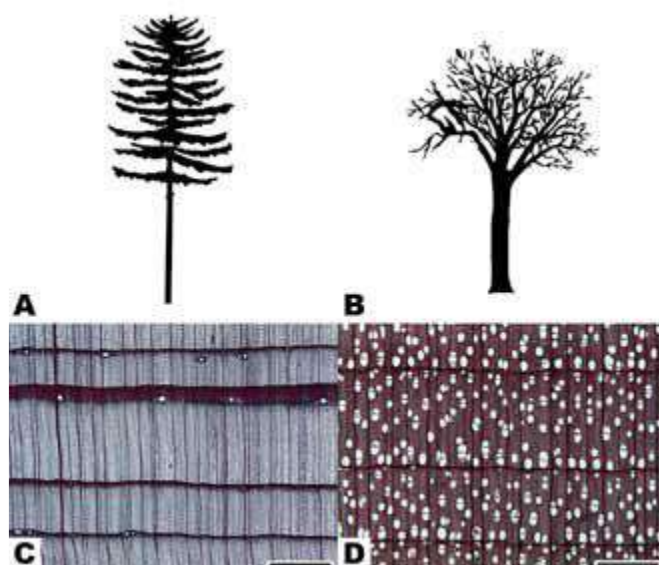


Figura 2.2- Classificação da madeira (a) Forma geral de coníferas (b) Forma geral de dicotiledôneas (c) Seção transversal da *Pseudotsuga mensiezii* (conífera) (d) Seção transversal da *Betula allegheniensis* (dicotiledônea)

(WIEDENHOEFT, 2010)

2.1.3 Composição química da madeira

A madeira é um composto natural com um conjunto de células especializadas que desempenham importantes funções como fornecer resistência mecânica aos galhos, conduzir líquidos essenciais e armazenar reservas de nutrientes, e suas propriedades são derivadas das estruturas da parede celular e das suas composições poliméricas (HAURIE *et al.*, 2018; RAMAGE, *et al.*, 2017).

Os principais biopolímeros que compõem a madeira são a celulose, hemicelulose e a lignina, além de outras substâncias denominadas de extrativos. Pinto (2019), citando Souza (2006), afirma que a variação das quantidades e características de cada um desses componentes resulta em madeiras com propriedades diferentes. Não existe uma faixa de porcentagem definida ao certo de cada componente da madeira, uma vez que trata-se de um material com variabilidade natural. O Quadro 2.1 apresenta a composição química da madeira proposta por diferentes autores.

Quadro 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.

(PINTO, 2019)

A maior parte dos tecidos vegetais de gimnospermas e angiospermas é composta por celulose (WINANDY & ROWEL, 2005). Este polímero é formado por um elevado número de unidades de glicose cujas regiões cristalinas melhoram a estabilidade térmica da madeira (YANG *et al.*, 2006). A hemicelulose é formada por polissacarídeos de baixo peso molecular (WALKER, 2006). A lignina, por sua vez, é um polímero aromático reticulado com peso molecular muito alto (YANG *et al.*, 2007; YANG *et al.*, 2006). A lignina também é frequentemente considerada como o agente cimentante que fornece à parede celular rigidez e resistência à compressão (RAMAGE *et al.*, 2017). Os extrativos exercem influência significativa em características das árvores como a variedade na coloração, cheiro, densidade, estabilidade dimensional, durabilidade e resistência ao ataque de fungos e insetos (STANLEY, 1969). Eles podem também afetar o valor calorífico e, portanto, a flamabilidade da madeira (WHITE, 2007). Klock e Andrade (2013) citam que gorduras, ceras, ácidos graxos, álcoois, esteróides, terpenos, lignanas, estilbenos, flavonóides e outros aromáticos são algumas das substâncias encontradas nos extrativos. A Figura 2.3 mostra a interação entre os biopolímeros da parede celular de uma madeira dura.

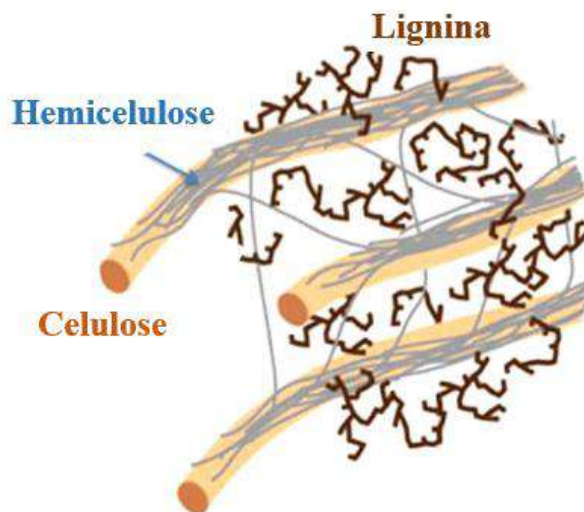


Figura 2.3- Interação entre polímeros da parede celular de madeira dura

(Adaptado de RAMAGE *et al.*, 2017)

2.1.4 Degradação térmica da madeira

Quando exposta ao fogo, a madeira sofre degradação térmica, incluindo diferentes processos termofísicos e termoquímicos como transferência de calor, secagem, pirólise, carbonização, perda de massa e combustão lenta. A morfologia e composição química da madeira afetam fortemente todos esses processos (FRIQUIN, 2011).

A degradação da madeira resultante de altas temperaturas pode levar a propriedades indesejáveis, como redução nas propriedades mecânicas do compósito desenvolvido (SHEBANI *et al.*, 2009). Reduções permanentes da resistência e do módulo de elasticidade podem ocorrer a temperaturas superiores a 65 °C, dependendo do valor da temperatura, pH da madeira, teor de umidade, meio de aquecimento, tempo de exposição, tratamento químico e espécie da madeira (WINANDY & ROWELL, 2013). Portanto, é de importância prática compreender e prever o processo de decomposição térmica da madeira para que esse conhecimento possa auxiliar na melhor elaboração de compósitos e estimar a influência da decomposição térmica da madeira nas propriedades do compósito (YAO *et al.*, 2008).

Normalmente, o processo de degradação térmica da madeira é dividido em cinco etapas, como apresentado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2- Fases de degradação da madeira

| Fase | Temperatura | Fenômeno |
|------|-----------------|--|
| I | Até 200 °C | - Processo denominado pirólise lenta. - Liberação de vapor d'água e gases. - A madeira não se igniza. - Existência de algumas reações exotérmicas de oxidação. - Mudança de cor. |
| II | 200 a 280 °C | - Aumento de reação química e eliminação de gases. - Ocorrência de reações exotérmicas primárias sem inflamação. - Temperatura considerada como a temperatura de ignição. - Fase conhecida como pirólise rápida. |
| III | 280 a 380 °C | - Produção de grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol. - O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatilizáveis em sua estrutura. - Fase exotérmica. |
| IV | 380 a 500 °C | - Redução da emissão de gases. - Produção de ácido acético, metanol, alcatrão e diversas substâncias gasosas condensáveis. - A perda de massa é da ordem de 70% em relação à massa original. - Fase exotérmica. |
| V | Acima de 500 °C | - Término da carbonização e início da gaseificação do carvão. - No interior da madeira permanece a temperatura das fases I, II e III. - Fase exotérmica. |

(FIGUEROA & DE MORAES, 2009)

As reações exotérmicas da queima da madeira começam a ocorrer entre 150 °C e 160 °C e crescem com o aumento da temperatura. Acima de 200 °C, esses fenômenos refletem-se na perda de massa acelerada e consequente redução da resistência mecânica da madeira (PONCSÁK *et al.*, 2006).

Os biopolímeros da madeira apresentam diferentes redes cristalinas e, portanto, exibem estabilidade térmica diferenciada. Segundo Kim *et al.* (2006) a despolimerização da hemicelulose ocorre entre 180 e 350 °C, a separação aleatória da ligação glicosídica da celulose entre 275 e 350 °C e a degradação da lignina entre 250 e 500 °C.

A hemicelulose tem uma estrutura amorfa aleatória e é facilmente hidrolisada (JOHN & THOMAS, 2008; YANG *et al.*, 2006). Em contraste, a molécula de celulose é um

polímero muito longo de unidades de glicose, e suas regiões cristalinas melhoram a estabilidade térmica da madeira (YANG *et al.*, 2006). A lignina é diferente da hemicelulose e da celulose pois é composta de três tipos de unidades de benzeno-propano, sendo fortemente reticulada e com peso molecular muito alto (JOHN & THOMAS, 2008; YANG *et al.*, 2006). Portanto, a estabilidade térmica da lignina é muito alta e é difícil de se decompor (YANG *et al.*, 2006).

2.1.5 Características de desempenho ao fogo da madeira

De acordo com Figueroa e Moraes (2009), a combustão é a transformação térmica em presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa por uma fonte externa de calor.

Várias características são utilizadas para quantificar o comportamento de queima da madeira quando exposta ao calor e ao ar. Além da degradação térmica da madeira pode-se citar ignição a partir de fontes de calor, liberação de calor e fumaça, propagação de chamas em ambientes aquecidos e taxas de carbonização. Este trabalho terá foco nas características de ignição e liberação de calor.

2.1.5.1 Ignição

Segundo Dietenberger e Hasburgh (2016), a ignição é o início visual da combustão (latência, brilho ou presença de chama) alimentada pela pirólise do material e para que ela ocorra, um fluxo de calor a partir do fogo ou objeto aquecido é necessário para induzir pirólise.

Em testes com fluxo de calor externo constante sobre a superfície da madeira, temperaturas na faixa de 300 - 400 °C foram medidas no momento da ignição. Estes valores coincidem com a etapa de decomposição térmica da madeira onde há uma produção significativa de voláteis inflamáveis. A partir desses testes pode-se determinar além da temperatura de ignição, o fluxo mínimo de calor e tempo necessário para que ocorra a ignição, perda de massa, e propriedades termofísicas (calor específico, condutividade e difusividade térmica) que variam de acordo com a densidade e teor de umidade do material. Expostas a um fluxo constante de calor, os tempos de ignição para madeira maciça normalmente variam de 3s para um fluxo de calor de 55 kW/m² a 930s para fluxo de calor de 18 kW/m² (DIETENBERGER & HASBURGH, 2016).

2.1.5.2 Taxa de liberação de calor

O calor de combustão depende do teor relativo de lignina, holocelulose e extrativos da madeira. Segundo Dietenberger e Hasburgh (2016), celulose e hemicelulose apresentam um valor de calor liberado de até 18,6 kJ/kg, entre 23,2 e 25,6 kJ/kg para a lignina e entre 32 e 37 kJ/kg para os extrativos.

Segundo Babraukas e Peacock (1992) a taxa de liberação de calor é a propriedade mais importante da reação ao fogo, uma vez que o calor liberado por um composto queimado pode fornecer energia térmica adicional para o crescimento e propagação do fogo, e o melhor método para determinar esta propriedade é através de ensaios com o cone calorímetro que é comumente baseado no consumo de oxigênio. O calor total liberado durante o período de combustão é considerado a medida mais confiável da contribuição do calor para um incêndio prolongado (MOURITZ *et al.*, 2007).

Segundo Rocha (2014), a camada de carvão formada sobre o material na queima fornece um isolamento térmico do fogo e gradualmente reduz a taxa de propagação de carbonização assim como da taxa de liberação de calor, colaborando positivamente para a capacidade resistente da madeira ao fogo mesmo quando exposta à altas temperaturas (Figura 2.4). Aumentando-se o fluxo de calor imposto, a ignição e o tempo de queima ocorrem mais rapidamente e o pico de taxa de liberação de calor é aumentado.



Figura 2.4- Seção carbonizada da madeira
(FIGUEROA *et al.*, 2009)

2.2 Bio-concretos

Govin (2004) define um compósito cimento – madeira como um material de matriz cimentícia com substituição total ou parcial de agregados minerais por partículas de madeira.

Uma grande vantagem da produção de bio-concretos é sua baixa densidade. Bio-concretos produzidos com cânhamo apresentam densidade variando entre 200 e 650 kg/m³, enquanto aqueles produzidos com madeira exibem densidade entre 700 e 1200 kg/m³ (DIQUÉLOU *et al.*, 2015). Um concreto convencional apresenta densidade entre 2200 e 2500 kg/m³.

Kruger *et al.* (2009) afirmam que painéis cimento-madeira conferem maior isolamento térmico e acústico às construções. Pode-se acrescentar ainda como vantagens deste material a alta disponibilidade de matéria-prima no Brasil e no mundo e a solução dada aos resíduos gerados.

Govin (2004) destaca como desvantagens para uso deste material a incompatibilidade química entre a madeira e o cimento, devido a presença de açúcares, resinas, fenóis e amido que afetam a hidratação do cimento, e a instabilidade dimensional que podem gerar fissuras devido às variações de umidade. Além disso, o tempo de pega do concreto é retardado e a durabilidade do compósito é reduzida no meio alcalino.

Bio-concretos podem ser aplicados em telhados, estruturas pré-fabricadas, formas permanentes, barreiras acústicas, painéis de isolamento térmico e confecção de casas de baixo custo (FAN, 2012).

Da Gloria (2015) desenvolveu painéis sanduíches com núcleos de bio-concreto de madeira, de densidades variando entre 800 e 1200 kg/m³, para avaliar a resistência à compressão e a condutividade térmica deste material que apresentaram tendência de decréscimo com a diminuição da densidade.

2.2.1 Matriz cimentícia e pozolânica

O setor de produção de cimento é o terceiro maior consumidor de energia do mundo, atrás apenas do setor de produção de alumínio e aço. As indústrias de cimento contribuem com

a emissão na atmosfera de aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de cimento produzido (ANDREOLA *et al.*, 2019).

Caldas *et al.* (2017) verificaram que na produção de bio-concretos utilizando matriz de cimento e bio-agregados de madeira, bambu e casca de arroz, o cimento é o principal encarregado pelo aumento das emissões dos gases do efeito estufa. Nesse contexto, Dinh (2014) destaca que além da utilização do bio-agregado para tornar o bio-concreto mais ecológico e econômico, os demais componentes da mistura devem acompanhar este princípio. Para solucionar esta problemática, a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos é uma opção para reduzir a poluição ambiental.

Amziane (2016) afirma que a matriz pode ser composta por cimento Portland ou cal aérea ou hidratada, normalmente associados com materiais pozolânicos como escória de alto forno, cinza volante e metacaulinita. Azevedo (2002) explica que materiais pozolânicos afetam positivamente as propriedades mecânicas e durabilidade dos bio-concretos minimizando problemas ambientais, controlando os fenômenos de exsudação e segregação da mistura devido à sua maior capacidade de absorção de água, melhorando a trabalhabilidade do bio-concreto no estado fresco (no caso da cinza volante), o que facilita a moldagem sem compactação, além de permitir obter valores de resistência mais altos. Além disso, Ferreira (2012) comenta que a substituição parcial do cimento Portland por pozolanas, como a cinza volante e a metacaulinita, é capaz de produzir uma matriz livre de hidróxido de cálcio.

2.2.2 Interação entre bio-agregado e cimento

Entre os fatores que influenciam no processo de produção do bio-concreto de madeira, a composição química da madeira é de fundamental importância na cura e endurecimento do cimento (IWAKIRI *et al.*, 2015). Amziane e Collet (2017) afirmam que determinados componentes químicos podem afetar negativamente as propriedades físico-químicas e de durabilidade e, assim, a performance dos bio-concretos que podem refletir na hidratação, endurecimento e propriedades mecânicas.

Simatupang *et al.* (1978) citados por Mendes *et al.* (2015) explicam que os extrativos presentes na composição química da madeira são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento, sendo seus princípios ativos os compostos fenólicos e os

carboidratos livres. Beraldo *et al.* (2002) também afirmam que a presença de açúcares e extrativos solúveis em água ou álcali retarda o tempo de pega do cimento.

De acordo com Quiroga *et al.* (2016), a presença de substâncias inibidoras promove a formação de uma membrana impermeável em torno de grãos de cimento não hidratados, impedindo o acesso da água até eles e causando uma redução na coesão do material. Segundo Sanderman e Brendel (1956), citados por Quiroga *et al.* (2016), em geral o grau de inibição de hidratação do cimento depende da quantidade e do tipo do açúcar. Por exemplo, a frutose não afeta a hidratação do cimento até concentrações de 0,50%, enquanto a glucose inibe completamente esse processo com concentrações de 0,25%.

2.2.3 Tratamentos corretivos

Dado o problema de incompatibilidade química entre a madeira e o cimento, diversos autores têm estudado métodos de tratamento da madeira que possam corrigir ou minimizar seus efeitos negativos quando estão em contato com uma matriz cimentícia.

Iwakiri *et al.* (2012) avaliaram o potencial de utilização das madeiras de *Schizolobium amazonicum* (“Paricá”) e *Cecropia hololeuca* (“Embaúba”) na produção de painéis cimento-madeira. Foram utilizadas partículas sem tratamento, imersas em água fria por 24 horas, imersas em água quente por 6 horas e em solução de NaOH 1% por 2 horas. Apesar dos métodos de tratamento não terem exercido muita influência nos resultados de propriedades mecânicas dos painéis, os que foram produzidos com partículas tratadas em água quente apresentaram melhores resultados.

Tchéhouali *et al.* (2013) estudaram a influência dos métodos de tratamento de seis espécies de madeira africanas para serem usadas em compósitos de cimento-madeira no Benin. O tratamento em água fria foi feito através de imersão por 48 horas em água a temperatura ambiente, enquanto o tratamento em água quente consistiu numa imersão por 48 horas em água a temperatura de 80 °C. A compatibilidade das espécies de madeira com cimento foi mensurada pela temperatura de hidratação do cimento. Os resultados mostraram que apenas uma espécie foi incompatível com o cimento e as demais mostraram moderada a boa compatibilidade com tratamento em água quente.

Castro *et al.* (2014) observaram o efeito de cinco tipos de pré-tratamento na compatibilidade entre a madeira do *Eucalyptus benthamii* e o cimento Portland. Foram

realizados os seguintes tratamentos: 24 horas de imersão em água fria, 6 horas de imersão em água quente (60 °C), 2 horas de imersão em solução alcalina (1% NaOH), adição de 3% de CaCl₂ e imersão em cal hidratada (relação 1:1). Foram realizados testes de hidratação e de compressão axial e o pré-tratamento que se mostrou mais eficiente para reduzir a inibição foi o de adição de 3% de cloreto de cálcio.

Bertolini *et al.* (2014) analisaram a performance mecânica em compressão de bio-concretos de madeira com partículas não tratadas e tratadas com imersão em água destilada a 80 °C. A imersão foi realizada em três ciclos (2 horas cada) com subsequente lavagem em água fria. A inclusão de partículas de madeira tratadas na fabricação do bio-concreto de madeira foi significativa ao aumentar os valores de módulo de elasticidade em 126% e de resistência à compressão em 70% comparados aos compósitos feitos com madeira não tratada.

Pinto (2019) aplicou diferentes pré-tratamentos na serragem de madeira visando a retirada de extrativos e reduzir os efeitos negativos na hidratação de matrizes cimentícias. Foram realizados tratamentos térmicos, variando-se a temperatura da água de 25 a 95 °C, o tempo de imersão entre 0,5 e 48 horas e a razão massa de serragem:volume de água entre 1:4 e 1:10, além de tratamentos alcalinos com cloreto de cálcio (CaCl₂) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂). Os resultados mostraram que a água aquecida a 80 °C retira uma maior quantidade de extrativos e que o tempo de imersão de 30 minutos foi suficiente para solubilizar os extrativos de modo a pouco afetar a hidratação dos bio-concretos. Além disso, bio-concretos produzidos com serragem tratada em solução de 4% de CaCl₂ apresentaram cinética de hidratação mais rápida.

2.3 Estabilidade térmica de concretos e bio-concretos

Alterações nas propriedades físicas e químicas do concreto ocorrem, devido à elevação da temperatura, e podem resultar em redução das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e módulo de elasticidade, fissuras e deslocamento afetando a capacidade resistente dos elementos e a estabilidade global do sistema estrutural (HAGER, 2013). O material utilizado na produção do concreto (tipo de agregado e cimento, relação água/cimento, adições e fibras) e fatores ligados ao incêndio como

tempo de exposição, taxa de aquecimento e umidade afetam a deterioração do concreto (KHOURY, 2000).

Segundo Fingerloos (2007), a natureza e a microestrutura do agregado afetam a estabilidade e a condutividade térmica do concreto, alterando a resistência residual. Em se tratando de bio-agregados de madeira, sua decomposição térmica ocorre a partir dos 180 °C até aproximadamente 500 °C, onde o resíduo principal é o carvão (FIGUEROA & DE MORAES, 2009).

O comportamento da pasta de cimento hidratada sob altas temperaturas depende da relação água/cimento, da relação CaO/SiO₂ (óxido de cálcio/dióxido de silício), da quantidade de Ca(OH)₂ (portlandita) formada, do grau de hidratação e umidade (MINDEGUIA *et al.*, 2012). Após a exposição a altas temperaturas, o resfriamento também promove alterações na pasta de cimento, uma vez que os produtos cimentícios da pasta podem se reidratar, formando novos componentes cristalinos. A cal formada também reidrata e expande, gerando novas fissuras (LIMA *et al.*, 2007)

Além das alterações físico-químicas na pasta de cimento e nos agregados, a incompatibilidade térmica entre ambos também é um fator responsável pelos danos no concreto provocados pelo aumento da temperatura. A interface entre agregados e pasta de cimento (*Interfacial Transition Zone – ITZ*) é conhecida como o “elo fraco” do concreto devido ao grande volume de vazios e fissuras na região, além da presença de C-S-H pouco cristalino e cristais secundários de portlandita e etringita (MEHTA & MONTEIRO, 2014). O aumento da temperatura do concreto acarreta em uma expansão térmica diferencial entre o agregado e a matriz de cimento, uma vez que a pasta, devido à desidratação, sofre um intenso processo de retração durante o aquecimento.

Muito foi pesquisado sobre a durabilidade térmica de concretos convencionais, além do crescente interesse pelo estudo dessa área em concretos reforçados com fibras ou produzidos com agregados reciclados. Entretanto, são escassos os estudos sobre durabilidade térmica de bio-concretos.

Da Silva (2017) estudou o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto sob altas temperaturas. A autora observou um aumento da ordem de 11% na resistência à compressão dos concretos submetidos à temperatura de 150 °C, justificado pela saída de água do material. Quando exposto à 400 °C, o concreto

apresentou perda de resistência de 4% e a redução foi em média de 46% quando a exposição foi à 650 °C. Esse comportamento de decréscimo de resistência é decorrente da desidratação dos produtos de hidratação e, possivelmente, da microfissuração da pasta de cimento e dos descolamentos e fissurações na interface argamassa-agregado.

Marques *et al.* (2013) investigaram os efeitos de elevadas temperaturas na performance mecânica de concreto produzidos com agregado reciclado de borracha. Em termos de resistência à compressão, para temperaturas de 400 °C e 600 °C a perda em performance foi similar ao concreto de referência. Para a temperatura de 800 °C as misturas com agregado reciclado apresentaram maiores perdas em resistência residual em relação à referência devido à decomposição da borracha nesta temperatura, o que cria vazios dentro do concreto e compromete sua performance mecânica.

Grubeša *et al.* (2018) estimaram a resistência ao fogo de misturas de concreto com fibras de cânhamo com base nos efeitos de altas temperaturas nas amostras de concreto. Para isso, submeteu amostras de concreto com diferentes tratamentos de fibras de cânhamo presentes em 1% em volume das misturas, a 400 °C, por uma hora a uma taxa de aquecimento de 1 °C/min. Os resultados apontaram uma redução média de 28% da resistência a compressão e de 45% do módulo de elasticidade dos concretos.

Baduge *et al.* (2019) estudaram a performance mecânica de concretos leves produzidos com agregados de cânhamo e aglutinantes com cenosferas e outros materiais pozolânicos, sem fazer uso de cimento. Os bio-concretos variaram de densidade de 1172 a 965 kg/m³ aos 14 dias de idade e foram submetidos às temperaturas de 300 °C e 600 °C. Os resultados em geral mostraram que a rigidez e tenacidade das amostras diminuíram significativamente com o aumento da temperatura. Para a mistura de maior resistência à compressão a temperatura ambiente (3,4 MPa), quando submetidos à 300 °C e 600 °C, houve um decréscimo de resistência 88% e 97% e de módulo de elasticidade de 73% e 88%, respectivamente.

2.4 Reação ao fogo de concretos e bio-concretos

Há uma diferença conceitual entre reação ao fogo e resistência ao fogo. A reação ao fogo descreve a facilidade com que um material pode ser inflamado e espalhar o fogo sob

condições específicas (STOLLARD & ABRAHAMS, 1999), enquanto a resistência ao fogo envolve elementos estruturais e descreve como um elemento é capaz de manter sua capacidade de vedação e isolamento e/ou resistência estrutural em condições de incêndio (DRYSDADE, 2011).

Produtos de construção são ensaiados em relação a sua reação ao fogo, cuja importância está em se determinar como o fogo se inicia e/ou como este vai se desenvolver nestes materiais. São avaliadas as propriedades de facilidade de ignição, propagação de chamas, evolução da fumaça e gases tóxicos e taxa de liberação de calor.

Segundo Lanos (2017), a classificação de reação ao fogo dos produtos é realizada de acordo com a terminologia do sistema Euroclass (EN 13501-1/2007). Este sistema para produtos de construção inclui principalmente materiais de revestimento de superfícies, revestimentos de piso, materiais de isolamento de tubos e cabos e divide em sete as principais classes de reação ao fogo: A1, A2, B, C, D, E e F. O Quadro 2.3 apresenta as principais características de reação ao fogo do Euroclass para produtos de construção.

Quadro 2.3- Principais características de reação ao fogo do Euroclass para produtos de construção segundo a EN 13501-2007

| Euro-class | Contribuição para o fogo/nível de segurança aspirado |
|-------------------|--|
| A1 | Os produtos da Classe A1 não contribuirão em nenhuma etapa do incêndio, incluindo o incêndio totalmente desenvolvido. Por essa razão, eles são considerados capazes de satisfazer automaticamente todos os requisitos de todas as classes inferiores. |
| A2 | Sob condições de um incêndio totalmente desenvolvido, esses produtos não contribuirão significativamente para a carga e crescimento dele. |
| B | Como Classe C, mas satisfazendo requisitos mais rigorosos. |
| C | Sob o ataque térmico por um item de queima única, eles têm propagação lateral da chama limitada. |
| D | São capazes de resistir, por um longo período, a um pequeno ataque de chama sem propagação substancial da mesma. Além disso, eles também são capazes de sofrer ataques térmicos por um único item de queima com liberação de calor suficientemente retardada e limitada. |
| E | Produtos capazes de resistir, por um curto período, a um pequeno ataque de chama sem propagação substancial da mesma. |
| F | Produtos para os quais não foram determinadas reações ao fogo, ou que não podem ser classificadas numa das classes A1, A2, B, C, D ou E. |

(Adaptado de LANOS, 2017)

Bio-agregados estão normalmente na classe F, enquanto concretos estão na B. Fibras de cânhamo apresentam classificação E, enquanto bio-concretos produzidos com cânhamo

com densidade variando entre 220 e 600 kg/m³, para diferentes aplicações, são classificados como B (LANOS, 2017). Desta forma, fica evidente que o desenvolvimento de materiais à base de bio-agregados tem significativa importância na melhoria de suas propriedades de reação ao fogo. Este autor afirma ainda que a introdução de revestimento mineral (cal, pasta de cimento e revestimento de sílica) em torno do bio-agregado é um método eficiente como retardador de chama.

No Japão é utilizado um código nacional de normas para as construções (*Building Standards Law*) que tem como principal propriedade para classificação dos materiais de revestimento a liberação de calor, através do cone calorímetro (HAKKARAINEN & HAYASHI, 2001). A NBR 15.575:2013 Edificações Habitacionais – Desempenho trata em algumas de suas partes a questão da normalização de segurança contra incêndio no Brasil através de uma abordagem sobre o controle das características de reação ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento, classificando-os quanto à combustibilidade.

São escassas as pesquisas realizadas envolvendo propriedades de combustão de concretos, pois sabe-se que este material não tem características de contribuição ao desenvolvimento de incêndios. Entretanto, com o surgimento de materiais alternativos, a necessidade desse estudo fica evidenciada para que se verifique se a utilização de materiais de diferentes origens no concreto provoca mudanças em seu comportamento ao fogo.

Puente *et al.* (2016) avaliaram as propriedades de combustão de pavimentos de concreto e asfalto através do cone calorímetro. Todas as amostras de material betuminoso apresentaram ignição num tempo entre 65 e 100 s com taxa de liberação de calor acima de 80 kW/m², enquanto para as quatro misturas de concreto, com agregados graúdos e miúdos, sob fluxo de calor de 75 kW/m², durante 30 minutos de ensaio, todas as amostras não apresentaram ignição.

Correia *et al.* (2012) investigaram o comportamento ao fogo de concretos produzidos com agregados reciclados de borracha em porcentagens de substituição de 5, 10 e 15%, sob fluxos de 25, 50 e 75 kW/m². Todas as amostras apresentaram ignição, com a presença de um pico de liberação de calor (PHRR) referente à ignição e combustão de voláteis da decomposição da borracha e diminuição do valor da taxa de liberação de calor (HRR) com o tempo devido à redução dos materiais combustíveis disponíveis para queima. Os

valores de PHRR variaram de 13,1 kW/m², para a menor quantidade de borracha e menor e fluxo, a 122,4 kW/m² para a maior quantidade de borracha e maior fluxo de calor.

2.5 Conclusões da revisão bibliográfica

A partir da revisão da literatura observou-se que o resíduo de madeira apresenta grande potencial de uso na indústria da construção civil, uma vez que se trata de um material com facilidade de obtenção, baixa densidade, e principalmente pela capacidade de isolamento térmico, melhorando a eficiência energética das construções

Pesquisadores têm produzido importantes trabalhos sobre desenvolvimento de compósitos cimento - madeira de baixa densidade e suas propriedades termofísicas como condutividade e difusividade térmica. Entretanto, ainda há uma lacuna na literatura sobre o estudo da reação ao fogo e comportamento físico e mecânico sob altas temperaturas do deste material.

Nesse contexto, é de grande importância analisar, por exemplo, diferentes teores de biomassa de madeira na produção de bio-concretos e diferentes temperaturas, além de características de desempenho ao fogo como tempo e temperatura de ignição, taxa de calor liberado, calor efetivo de combustão e perda de massa, uma vez que o uso deste material na construção civil deve garantir a segurança das edificações.

3 Materiais e Metodologia Experimental

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos de obtenção e processamento do bio-agregado de serragem de madeira, os materiais utilizados para a confecção dos bio-concretos, assim como a descrição dos ensaios e equipamentos utilizados para a caracterização desses. Do mesmo modo, são descritos os métodos de preparo e cura dos bio-concretos, além dos procedimentos adotados para o estudo de sua estabilidade térmica e reação ao fogo.

O programa experimental, de maneira geral, pode ser dividido em cinco etapas que são apresentadas por meio de um esquema apresentado na Figura 3.1 e são descritas a seguir:

1. Caracterização do bio-agregado de madeira e materiais cimentícios por meio de ensaios normalizados ou adaptações deles;
2. Pré-tratamento da serragem de madeira a partir de diferentes métodos, para definição do melhor a ser empregado em termos de resistência mecânica do bio-concreto;
3. Caracterização dos bio-concretos de madeira (40, 50 e 60%) antes do aquecimento através da determinação das propriedades de espalhamento, densidade e condutividade térmica;
4. Determinação da estabilidade térmica do bio-concreto avaliando suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais. Esta etapa consistiu em submeter os corpos de prova a temperaturas de 100, 150, 200 e 250 °C e avaliar a influência da temperatura nas propriedades do bio-concreto, comparando os resultados com os obtidos pelos corpos de prova a temperatura ambiente (22 °C);
5. Estudo das propriedades de reação ao fogo dos bio-concretos (40, 50, 60 e 70%) através do ensaio do cone calorímetro de perda de massa.

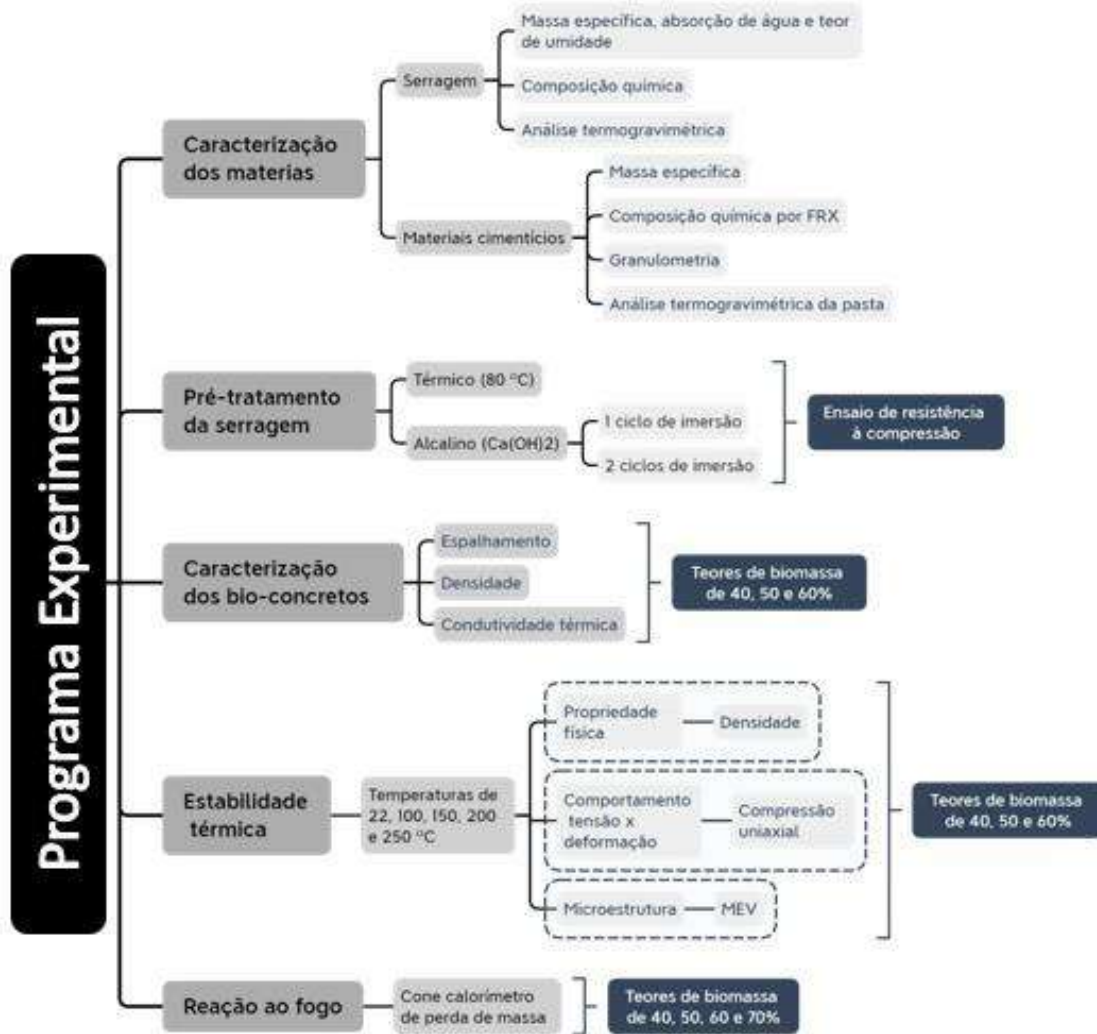


Figura 3.1- Programa experimental da pesquisa

3.1 Materiais utilizados

Para a confecção das misturas de bio-concreto utilizou-se a serragem de madeira como bio-agregado, cimento Portland CP V - ARI, cinza volante, metacaulinita, cloreto de cálcio puríssimo como aditivo químico e água. A procedência destes materiais está descrita nos itens a seguir.

3.1.1 Serragem de madeira

Foram utilizados nesta pesquisa resíduos de madeira em forma de serragem, provenientes da madeireira Madeirama, localizada na cidade do Rio de Janeiro. O material coletado é

resultado da mistura aleatória da serragem de árvores das espécies Angelim pedra, Cedro, Cedrinho e Maçaranduba (Tabela 3.1).

Tabela 3.1- Classificação das espécies que compõem a mistura do bio-agregado

| Nome comum | Família | Nome científico | Tipo de madeira |
|-------------------|----------------|------------------------|------------------------|
| Angelim pedra | Fabaceae | Hymenolobium petraeum | Dicotiledônea |
| Cedro | Meliaceae | Cedrela fissilis | Dicotiledônea |
| Cedrinho | Vochysiaceae | Erismia uncinatum warm | Conífera |
| Maçaranduba | Sapotaceae | Manilkara salzmanni | Dicotiledônea |

Para a obtenção do bio-agregado com as características requeridas para a produção do bio-concreto foi necessário que a serragem de madeira passasse pelos processos de separação da fração grossa dos finos, pré-tratamento afim de haver compatibilização deste material com o cimento, além de homogeneização do material tratado. Tais processos estão descritos a seguir.

3.1.1.1 Obtenção da fração grossa da serragem de madeira

O resíduo de madeira seco, recebido em forma de serragem, passou por um processo de separação de partículas grossas dos finos através do uso de peneirador mecânico de malha de 1,18 mm. O objetivo foi obter bio-agregados nas dimensões superiores a 1,18 mm e eliminar os finos da mistura que potencialmente poderiam absorver mais água na mistura devido a sua grande área específica (DA GLORIA, 2015). O peneirador utilizado pode ser visto na Figura 3.2.



Figura 3.2- Peneirador mecânico com peneira de malha de 1,18 mm

Após a separação, o material retido na peneira de malha de 1,18 mm foi reservado para ser posteriormente tratado e homogeneizado. As partículas retidas na peneira de malha de 1,18 mm foram utilizadas na produção de bio-concretos, já as partículas passantes foram descartadas. A Figura 3.3 ilustra as partículas retidas e as passantes desta peneira.



(a)



(b)

Figura 3.3- Partículas de bio-agregados resultantes da separação na peneira de malha de 1,18 mm (a) Partículas retidas; (b) Partículas passantes

3.1.1.2 Homogeneização

O método do tipo pilha alongada foi utilizado para o processo de homogeneização do material. O preparo deste método consiste na divisão do material em quantidades iguais, seguido do seu espalhamento em formato de uma pilha alongada com lançamentos em sentidos opostos até a dispersão total da serragem. Por fim, o material das extremidades

foi retirado e lançado novamente na pilha. Foram homogeneizados aproximadamente 40 kg de serragem e o processo de espalhamento está ilustrado na Figura 3.4.



(a)



(b)

Figura 3.4- Homogeneização do tipo pilha alongada utilizado para os bio-agregados (a) Espalhamento do material em pilha; (b) Pilha alongada após homogeneização

3.1.2 Materiais Cimentícios

Foram utilizados para a produção dos bio-concretos o Cimento Portland CP V – ARI produzido pela empresa Holcim, a cinza volante fornecida pela Pozofly e a metacaulinita provém da empresa Metacaulim do Brasil, todos pertencentes ao mesmo lote de produção.

Com a finalidade de reduzir os problemas de durabilidade dos compósitos produzidos, a utilização das pozolanas (cinza volante e metacaulinita) em substituição parcial do cimento Portland foi feita com o intuito de se obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio (FERREIRA, 2012), uma vez que, segundo Da Gloria (2015) comenta, a alcalinidade da matriz é em grande parte responsável pela degradação de fibras vegetais.

3.1.3 Aditivo químico

Como aditivo, com função de acelerador de pega, foi utilizado neste trabalho o cloreto de cálcio puríssimo. De acordo com os resultados obtidos em pesquisas realizadas por Latorraca (2000) e Iwakiri (2012), o teor de 3% em relação à massa dos materiais cimentícios foi adotado.

3.1.4 Água

Para todo o desenvolvimento experimental desta pesquisa a água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

3.2 Métodos de caracterização dos materiais

3.2.1 Serragem de madeira

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

A massa específica aparente (γ_a) foi determinada de acordo com adaptações da norma NBR NM 52 (2009), que foi desenvolvida para agregados. A princípio a serragem ficou submersa em água por 24 horas e então foi exposta ao ar até que ficasse em estado saturada superficialmente seca. Foram então separadas três amostras de 75 gramas deste material, postas em frascos do tipo Erlenmeyer com água até a marca de 500 ml e mantidas em um banho com temperatura de 21 °C (Figura 3.5). Após 1 hora, completou-se com água até a marca de 500 ml novamente e o conjunto é pesado para registro da massa total. Por fim, as amostras foram retiradas e postas separadamente na estufa a 105 °C até apresentarem constância de massa.



Figura 3.5 - Frascos com amostras do bio-agregado para determinação da massa específica

A absorção de água da serragem foi determinada em condições de mistura de forma a simular o processo na produção do bio-concreto de madeira utilizado neste trabalho. Para isso, 300 gramas de serragem seca e 3 litros de água foram inseridos em uma argamassadeira de volume de 20 litros e misturados durante 4 minutos, que é o tempo

total de mistura para a produção do bio-concreto. A água foi adicionada aos poucos, como na produção do bio-concreto.

Após a mistura, o bio-agregado foi reservado em peneira de abertura de 2,0 mm para escorrer a água durante 5 minutos. Passado esse tempo, o material foi pesado para definição da absorção (Equação 1).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A: absorção de água (%);

m: massa da amostra seca (g);

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

O teor de umidade do material seco ao ar foi determinado conforme especificações da NBR 9939 (2011). Três amostras de serragem foram levadas à estufa, com temperatura regulada de 105°C, até apresentarem constância de massa para que fosse possível calcular o valor desta propriedade.

3.2.1.2 Composição química

A metodologia utilizada para a obtenção da composição química da madeira em estudo foi proposta por Abreu *et al.* (2006), do Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas/UFRRJ, e realizada para a serragem de madeira por Pinto (2019).

De forma simplificada, o procedimento foi realizado em quatro etapas. A etapa de retirada de extrativos foi feita com uso de três diferentes solventes: ciclohexano, acetato de etila e metanol. Com a madeira livre de extrativos, determinou-se a quantificação da lignina misturando à amostra ácido sulfúrico. Para a determinação da holocelulose por cloração, a amostra livre de extrativos foi diluída em água destilada quente, ácido acético e clorito de sódio. Na última etapa, para determinação do teor de celulose, a amostra foi preparada a partir da holocelulose e foram utilizados como reagentes o hidróxido de sódio nas concentrações de 17,5% e 8,3% e ácido acético na concentração de 10%. Finalmente, a quantidade de hemicelulose foi obtida pela diferença entre a holocelulose e a celulose.

A Figura 3.6 ilustra o procedimento de ensaio para a obtenção da composição química da madeira.

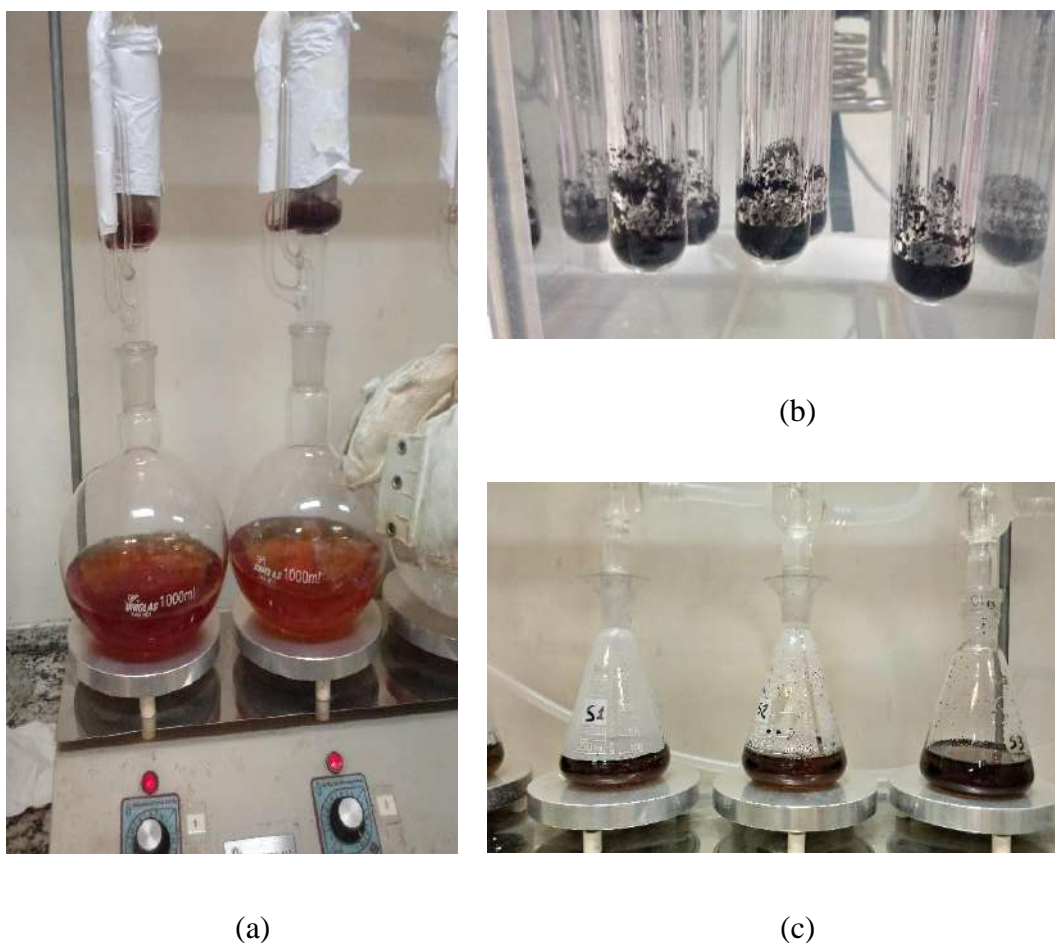


Figura 3.6- Determinação da composição química da madeira (a) Retirada de extrativos (b) Quantificação da lignina (c) Quantificação da celulose

3.2.1.3 Análise termogravimétrica

A termogravimetria da serragem foi realizada pelo equipamento SDT Q600 TA Instruments, com as seguintes condições experimentais: taxa de aquecimento constante de 10 °C/min; temperatura entre 23 e 1000 °C; gás de arraste foi o ar com vazão de 100 mL/min; massa de amostra de aproximadamente 10 mg; e cadinho aberto de alumina. A serragem utilizada no ensaio foi resultado da trituração através do uso de um moinho de facas e posterior peneiramento para utilizar as partículas passantes na peneira nº 16 (malha 40 ASTM) e retidas na peneira nº 24 (malha 60 ASTM).

Foram realizadas análises dentro de atmosfera inerte (N₂) e outra em ar sintético para que fosse avaliada a influência da atmosfera oxidativa na degradação térmica da madeira.

3.2.2 Materiais cimentícios

Os ensaios de caracterização do cimento Portland, metacaulinita e cinza volante foram realizados no Microlab do LABEST/COPPE/UFRJ.

3.2.2.1 Composição química por FRX e massa específica

A composição química em termos de óxidos foi determinada por um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, modelo Ray ny EDX 720 da Shimadzu. A massa específica foi verificada por um picnômetro a gás hélio de modelo AccuPyc 1340 (Micrometrics).

3.2.2.2 Análise granulométrica

Para a análise granulométrica, a distribuição do tamanho de partículas dos materiais foi determinada através de granulometria a laser pelo equipamento Malvern Mastersize (2000). O líquido dispersante utilizado foi o álcool etílico absoluto PA no caso do CP V - ARI e água para a cinza volante e metacaulinita, com um tempo de dispersão de 5 min e velocidade de 2150 rpm.

3.2.3 Pasta de cimento e pozolanas

Foi produzida uma pasta com mesmas as características da que compõe o bio-concreto (40% de cimento, 30% de metacaulinita e 30% de cinza volante e relação água/cimento de 0,35) com o intuito de se avaliar sua degradação térmica. Após sete dias de cura, o material foi macerado e então submetido ao ensaio de termogravimetria.

3.2.3.1 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica da pasta composta por cimento, metacaulinita e cinza volante foi realizada através do equipamento SDT Q600 TA Instruments, com as seguintes condições experimentais: taxa de aquecimento inicial constante de 10 °C/min de 23 à 35 °C, seguido de uma isoterma a 35 °C durante 1 hora para a secagem da amostra e eliminação da água não combinada, e aquecimento à 10 °C/min de 35 à 1000°C; gás de arraste nitrogênio com vazão de 100 mL/min; massa de amostra de aproximadamente 10 mg; e cadinho aberto de alumina. O ensaio foi realizado com a pasta com idade de 7 dias.

3.3 Pré-tratamento da serragem de madeira

Com base no trabalho de Pinto (2019), alguns métodos de lavagem da serragem de madeira foram adotados para avaliar a retirada de extrativos a partir de resultados de resistência à compressão uniaxial aos 7 dias de idade de bio-concretos produzidos com a serragem tratada. Foram realizados três métodos de tratamento:

- a. Tratamento térmico: a serragem, na razão de massa 1/10 (serragem/água), foi imersa em água a temperatura de 80 °C, durante 1 hora;
- b. Tratamento alcalino 1: a serragem, na razão de massa 1/10 (serragem/água), foi imersa em solução de hidróxido de cálcio (0,73% em volume de Ca(OH)_2), durante 1 hora;
- c. Tratamento alcalino 2: a serragem, na razão de massa 1/10 (serragem/água), foi imersa em solução de hidróxido de cálcio (0,73% em volume de Ca(OH)_2) por duas vezes, tendo cada lavagem duração de 1 hora.

A razão entre a massa da serragem e de água (m_s/m_a) foi escolhida, uma vez que foi utilizada nos trabalhos de Da Gloria (2015) e Andreola (2017). Pinto (2019), a partir de resultados de ensaios de tempo de pega, determinou que 80 °C era a melhor temperatura para um tratamento térmico. Os tratamentos alcalinos em solução de Ca(OH)_2 foram feitos baseados nos estudos realizados por Iwakiri *et al.* (2015) e Quiroga *et al.* (2016).

Após as lavagens, o material foi colocado em bandejas e armazenado na câmara de 40 °C para secagem durante 48 horas. Por fim, a serragem foi retirada e armazenada em sacos plásticos fechados, a temperatura ambiente. A Figura 3.7 ilustra os métodos de tratamento e disposição para secagem do material.

Com a serragem tratada destas três formas, foram moldados 5 corpos de prova de bio-concreto para cada tratamento. Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial do bio-concreto aos 7 e 28 dias de idade e o melhor resultado definiu como a serragem foi tratada para o desenvolvimento da pesquisa.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.7- Métodos de tratamento da serragem de madeira. (a) Tratamento térmico em água a 80 °C (b) Tratamento alcalino em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (c) Disposição da serragem para secagem.

3.4 Produção do bio-concreto

3.4.1 Compensação de água

Para que a dosagem de bio-concretos seja eficiente, a água absorvida pelos agregados durante o processo de mistura deve ser considerada. Para tanto, a água de compensação foi determinada multiplicando-se a massa de serragem pela porcentagem de absorção de água obtida na caracterização do bio-agregado.

Como forma de garantir que a quantidade de água utilizada na produção do bio-concreto seja suficiente, a água total apresentada na dosagem é a soma da água de hidratação do cimento com a água de compensação, definida pela capacidade de absorção do agregado de madeira.

3.4.2 Dosagem do bio-concreto

Para a produção do bio-concreto de madeira foram selecionadas três frações volumétricas diferentes de agregado de madeira: 40%, 50%, 60% e 70%, sendo estas substituições feitas em volume. A relação água/cimento (água de hidratação/materiais cimentícios) foi fixada em 0,35 para todas as misturas. A matriz cimentícia é composta por 40% de cimento, 30% de metacaulinita e 30% de cinza volante. O teor de cloreto de cálcio foi

fixado em 3% em relação à massa dos materiais cimentícios de cada mistura e a quantidade de água total é soma da água de hidratação com a água de compensação. Estes teores foram definidos com base no trabalho de Andreola *et al.* (2019) com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e melhorar a resistência mecânica dos bio-concretos. Pode-se observar na Tabela 3.2 o detalhamento da dosagem das misturas de bio-concreto utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 3.2- Dosagem do bio-concreto de madeira (kg/m³)

| Materiais | BCM40 | BCM50 | BCM60 | BCM70 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cimento | 283,20 | 236,00 | 188,80 | 141,60 |
| Metacaulinita | 212,40 | 177,00 | 141,60 | 106,20 |
| Cinza volante | 212,40 | 177,00 | 141,60 | 106,20 |
| Serragem de madeira | 232,00 | 290,00 | 348,00 | 406,00 |
| Cloreto de cálcio | 26,56 | 22,14 | 17,71 | 13,28 |
| Água de compensação | 185,60 | 232,00 | 278,40 | 324,80 |
| Água de hidratação | 247,80 | 206,50 | 165,20 | 123,90 |
| Água total | 433,40 | 438,50 | 443,60 | 448,70 |

3.4.3 Processo de produção

Os bio-concretos foram produzidos em uma argamassadeira modelo 20 LAM, fabricada pela Amadio, com capacidade de mistura de 20 litros. Os procedimentos utilizados para a produção do bio-concreto de madeira foram baseados na pesquisa de Da Gloria (2015). São eles:

- a. Mistura dos materiais cimentícios e agregado de madeira seco (1 minuto);
- b. Adição progressiva da água total misturada previamente com o cloreto (1 minuto);
- c. Mistura até a homogeneização do bio-concreto (até o 4º minuto).

Para o processo de moldagem dos corpos de prova, o bio-concreto fresco foi adicionado aos moldes, previamente limpos e lubrificados com óleo mineral, em três camadas e adensados em mesa vibratória (68 Hz) durante 10 segundos cada camada. Os moldes foram mantidos em sala com temperatura de 21 °C por 24 horas. Após desmoldagem, os corpos de prova foram levados para cura seca onde permaneceram até atingirem idade de ensaio.

3.5 Caracterização dos bio-concretos

Foi realizada uma caracterização dos bio-concretos antes de submetê-los ao aquecimento para o estudo da estabilidade térmica e reação ao fogo. Para isso, foram realizados ensaios de espalhamento, densidade e condutividade térmica.

3.5.1 Espalhamento e massa específica aparente

O ensaio de espalhamento (*Flow table test*) foi feito com o bio-concreto em estado fresco de acordo com a NBR 13276 (2016). A massa específica aparente de corpos-de-prova de diferentes teores de biomassa foi aferida após 28 dias de cura seca em uma sala à temperatura de 22 ± 3 °C, a partir da NBR 9778 (2009).

3.5.2 Condutividade térmica

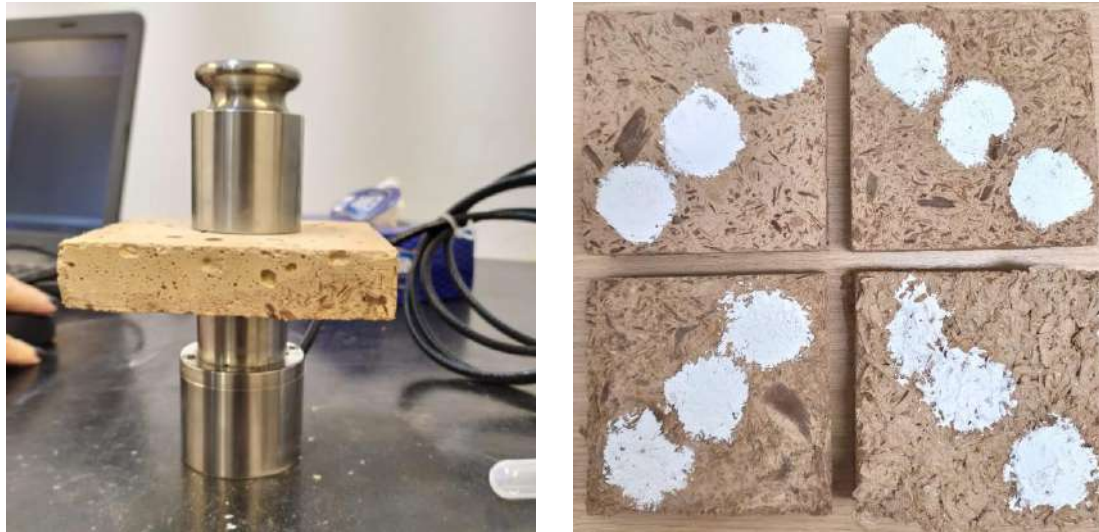
A determinação da condutividade térmica do bio-concreto de madeira foi feita utilizando-se o equipamento TCi C-Therm apenas com as amostras em temperatura ambiente e teor de umidade médio de 16%. Foram ensaiadas amostras com teores de biomassa de 40, 50 e 60%. Três corpos de prova de dimensões 100 x 100 x 25 mm (comprimento x largura x espessura) foram avaliados para cada teor de biomassa, com três pontos de leitura (dois nos extremos e um no centro) e quatro leituras realizadas em cada ponto utilizando-se uma pasta térmica nestes pontos como agente de contato.

O equipamento funciona através da aplicação de uma fonte de calor na amostra (de superfície plana) por meio de um sensor de refletância que resulta no aumento da temperatura na interface sensor-amostra e induz uma mudança de voltagem no sensor. Tal mudança de voltagem é utilizada para determinar as propriedades térmicas do material. O software exporta o valor de condutividade térmica κ (em W/mK) para cada leitura. Para se obter um valor médio e que melhor represente a condutividade térmica do material, o seguinte procedimento foi adotado:

- a. Calculou-se a média entre as quatro leituras realizadas para definir a condutividade em cada ponto;
- b. Calculou-se a média entre os pontos para definir a condutividade em cada corpo de prova;

- c. Calculou-se a média entre os corpos de prova para definir um valor médio de condutividade do bio-concreto.

A Figura 3.8 ilustra o método de ensaio e a marcação dos pontos de leitura nos corpos de prova.



(a)

(b)

Figura 3.8- Ensaio de condutividade térmica (a) Ensaio em andamento (b) Marcação dos pontos de leitura nos corpos de prova

3.6 Estabilidade térmica do bio-concreto de madeira

Para a análise da estabilidade térmica do bio-concreto, os corpos de prova ao atingirem as idades de ensaio foram levados ao forno tipo mufla a diferentes temperaturas. Foram estudadas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais. A Figura 3.9 esquematiza o programa experimental deste estudo.

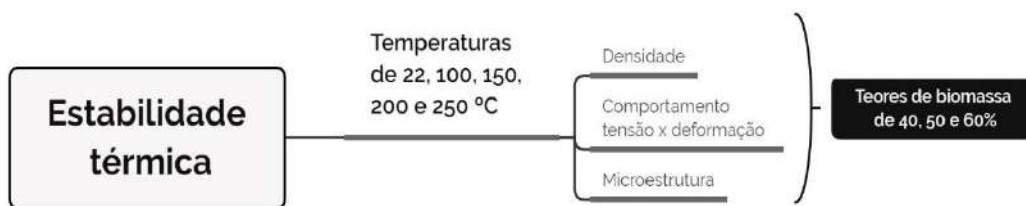


Figura 3.9- Esquema do programa experimental de estabilidade térmica do bio-concreto

No processo de aquecimento dos corpos de prova, o equipamento utilizado foi um forno tipo mufla da M.S Mistura, modelo MSM-010, que pode atingir a temperatura de até 1000 °C. A taxa de aquecimento foi de 2 °C/min, baseada no trabalho de Da Silva (2017), e atingida a temperatura de estudo, esta foi mantida constante durante 1 hora. A Figura 3.10 ilustra a curva de aquecimento dos bio-concretos. A escolha das temperaturas de estudo com limite superior de 250 °C se justifica a partir do resultado obtido na termogravimetria da serragem, que apresenta elevada perda de massa a partir desta temperatura. O arrefecimento dos corpos de prova aconteceu de forma natural, com a porta do forno fechada. Atingida a temperatura de referência os corpos de provas foram submetidos aos ensaios físicos e mecânicos. Também foram produzidos corpos de prova e mantidos a temperatura ambiente que foram ensaiados e utilizados como referência.

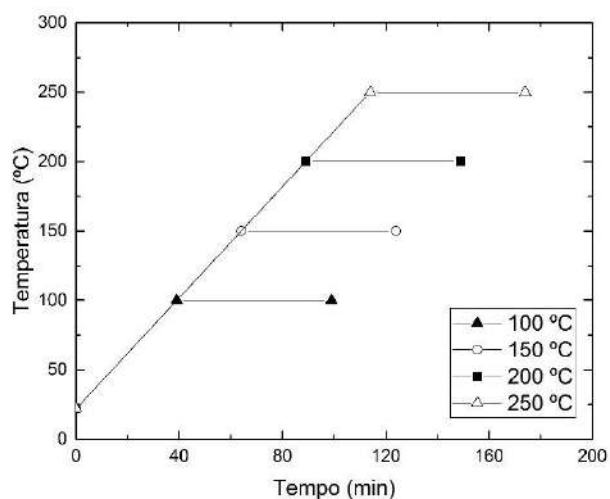


Figura 3.10- Curva de aquecimento

3.6.1 Propriedade física

3.6.1.1 Massa específica aparente

O ensaio de determinação de massa específica aparente foi realizado para cada mistura e temperatura, aos 28 dias de idade, com 4 corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) para cada configuração, de acordo com a NBR 9778 (2009). Para o cálculo da massa específica aparente foi considerada a massa do corpo de prova após sair da mufla.

3.6.2 Comportamento tensão x deformação

Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial para o estudo do comportamento tensão x deformação do bio-concreto de madeira. Para isto, foram moldados 4 corpos de prova para cada mistura e temperatura a ser estudada. Estes ensaios foram realizados com corpos de prova de idade de 28 dias.

3.6.2.1 Compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial e determinação do módulo de elasticidade do bio-concreto seguiu as prescrições da NBR 5739 (2018) e NBR 8522 (2017). Corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) foram ensaiados em prensa servo-controlada modelo *Shimadzu* – 1000 kN com velocidade de deslocamento de 0,3 mm/min. Transdutores elétricos (LVDTs) foram instalados para a medição dos deslocamentos longitudinais (Figura 3.11). Foi realizada uma análise da tenacidade das amostras a partir de adaptações da ASTM C1018 (1997).



Figura 3.11- Ensaio de compressão uniaxial do bio-concreto de madeira

3.6.3 Microestrutura

A análise microestrutural do bio-concreto foi utilizada para se investigar as interfaces de ligação entre os bio-agregados de madeira e pasta cimentícia que os envolve, bem como observar a decomposição da serragem nas temperaturas estudadas. As amostras fraturadas, que apresentavam comprimento de aproximadamente 1 cm, são provenientes dos corpos de prova que passaram por ensaios de compressão uniaxial e foram obtidas sem aplicação de qualquer ferramenta que pudesse danificar sua estrutura.

As imagens foram obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo *Hitachi TM 3000* do Microlab no LABEST/COPPE/UFRJ, para obtenção de imagens de alta ampliação e resolução a partir da transcodificação da energia emitida por elétrons. Amostras do bio-concreto fraturado foram aderidas ao porta-amostra por meio de um adesivo condutor de carbono, não sendo necessário recobrimento para a realização do ensaio.

3.7 Reação ao fogo do bio-agregado e bio-concreto de madeira

Os testes experimentais para avaliação da inflamabilidade e propriedades de combustão do bio-concreto e bio-agregado de madeira foram realizados utilizando o Cone Calorímetro de Perda de Massa (CCPM) no Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ, de acordo com as normas ISO 17554 (2014) e ISO 13927 (2015).

3.7.1 Cone Calorímetro de Perda de Massa (CCPM)

Segundo Wang *et al.* (2017), o cone calorímetro de perda de massa é atualmente o método mais avançado para avaliar a reação ao fogo dos materiais. Este equipamento permite a obtenção de dados numéricos dos seguintes parâmetros:

- a. Taxa de liberação de calor por unidade de área (*Heat Release Rate* – HRR), Pico da taxa de liberação de calor (PHRR) e valor médio de taxa de liberação de calor (MHRR) em kW/m²: os valores são registrados em função do tempo decorrido do teste e a aquisição de dados foi feita em intervalos de 1s;
- b. Calor total liberado (*Total Heat Release* – THR) em MJ/m²: trata-se da soma do calor liberado durante todo o teste;
- c. Taxa de perda de massa (*Mass Loss Rate* – MLR) em g/s: consumo da massa inicial em função do tempo de ensaio;
- d. Total de massa perdida (*Total Mass Loss* – TML) em %;
- e. Calor efetivo de combustão (*Effective Heat of Combustion* – EHC) em MJ/kg: relação entre calor total liberado e perda de massa total;
- f. Tempo de ignição (*Time to Ignition* – TTI) em s: tempo necessário para o início da chama na superfície das amostras.

A determinação da temperatura de ignição (*Temperature of ignition* – TIG) e do monitoramento da temperatura durante o ensaio foram feitos através da instalação de um termopar no equipamento sobre a superfície das amostras.

O equipamento é constituído por um aparato experimental e uma unidade de controle (Figura 3.12). O aparato experimental é composto por (1) aquecedor cônico, (2) balança, (3) ignição por faísca, (4) medidor de fluxo, (5) três termopares de controle, (6) mecanismo de isolamento de calor, (7) suporte ajustável para amostras horizontais, enquanto a unidade de controle contém (8) controlador de temperatura com leitura digital,

(9) interruptores para alimentação, ignição, célula de carga e aquecedor cônico, e (10) controlador da célula de carga e tara eletrônica com leitura digital.

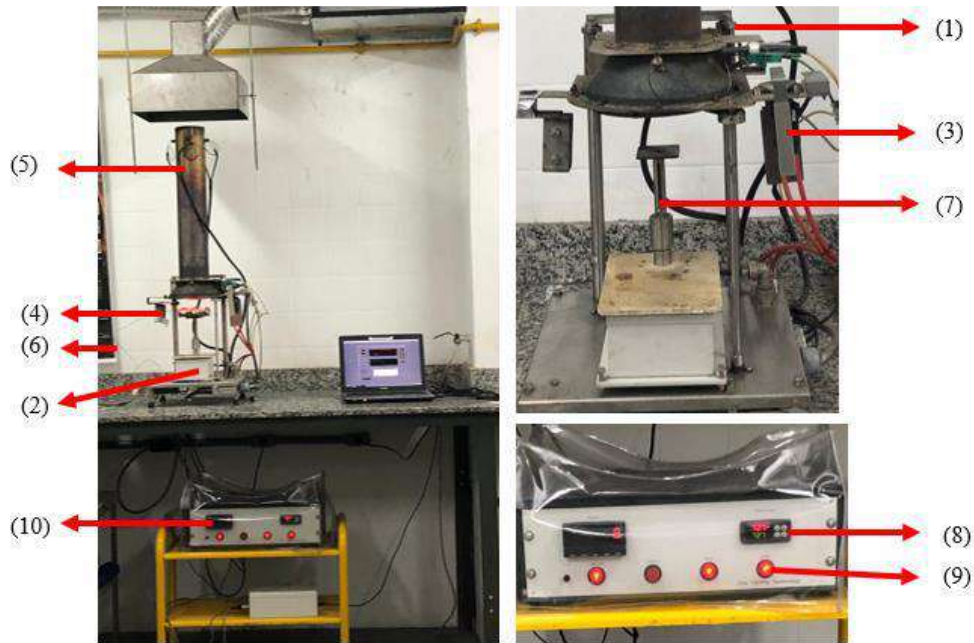


Figura 3.12- Cone Calorímetro e unidade de controle

(GOMES, 2019)

O método de ensaio do CCPM é baseado na observação de que o calor total liberado é diretamente relativo à temperatura dos gases de combustão da chaminé que, por sua vez, é uma função das componentes do gás metano. De maneira geral, no ensaio, uma amostra é posta em uma balança que registra a taxa de perda de massa durante o processo de combustão, enquanto sua superfície é exposta a uma radiação constante de calor, que varia entre 25 e 100 kW/m² (Figura 3.13). As amostras foram irradiadas na posição horizontal sob fluxo de calor de 50 kW/m², que segundo Schartelk *et al.* (2005) corresponde ao calor liberado em incêndios bem desenvolvidos.

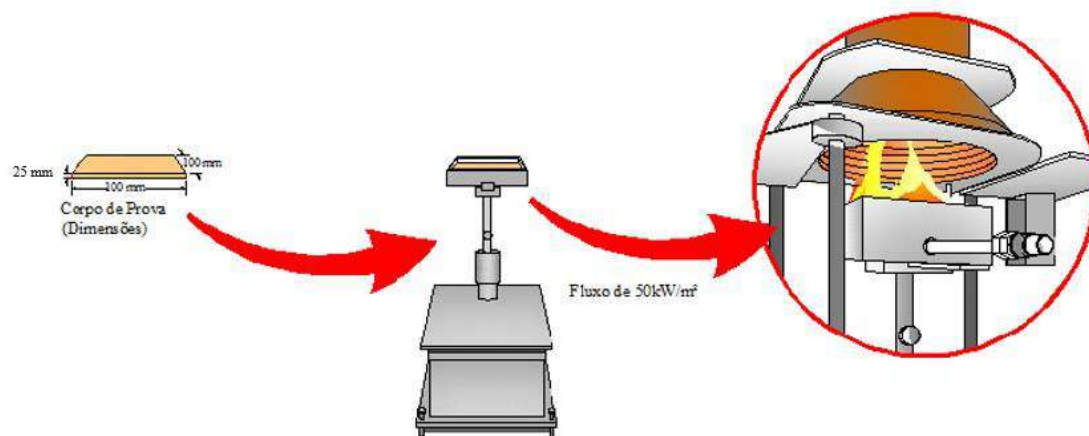


Figura 3.13- Esquema geral do ensaio no CCPM de orientação horizontal
(Adaptado de NASCIMENTO, 2018)

3.7.2 Metodologia de ensaio

Foram conduzidos testes com o bio-agregado de madeira em sua forma serragem e com o bio-concreto nas dimensões de 100 x 100 x 25 mm (comprimento x largura x espessura) (Figura 3.14).



(a)



(b)

Figura 3.14- Amostras para ensaio do cone calorímetro (a) serragem de madeira (b) bio-concreto

Os ensaios foram realizados com as amostra de bio-concreto sem umidade, considerando assim a pior situação. Para isso, os corpos de prova foram secos em estufa com

temperatura regulada de 105 °C por 48 horas, e posteriormente postos em dessecadores para que não ganhassem umidade até a realização do ensaio (Figura 3.15).



Figura 3.15- Uso de dessecadores para evitar ganho de umidade no bio-concreto

Os procedimentos experimentais são descritos a seguir:

- a. Calibração da célula de carga: o suporte era colocado vazio sobre a balança para tarar o painel. Em seguida, a amostra junto ao suporte era colocada na balança para obtenção da massa apenas da amostra;
- b. Aquecimento do cone calorímetro: durante o processo o aquecedor funcionava a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min enquanto os três termopares posicionados no equipamento mediam a sua temperatura. O fluxo de calor definido foi de 50 kW/m² e a distância entre o cone e a amostra de 25 mm;
- c. Controle do fluxo de calor: quando o cone atingia a temperatura pré-determinada, de 783 °C para um fluxo de calor de 50 kW/m², eram aguardados 10 minutos para que a temperatura fosse estabilizada;
- d. Início dos testes: estabilizada a temperatura, o cone era fechado e o programa (*MLCCalc*) iniciado para a obtenção dos dados. Eram então inseridos no *software* os valores de entrada (nome da amostra, teor de umidade, espessura, área, massa inicial e observações). Depois, abria-se o cone e aguardava-se 60 segundos para que o aquecedor entrasse em equilíbrio térmico. Fechava-se o cone novamente para inserir a amostra sobre a célula de carga e dar início ao ensaio;
- e. Obtenção dos dados: as leituras dos valores de perda de massa e taxa de liberação de calor eram feitas simultaneamente logo após a reabertura do aquecedor. O

tempo de ignição era determinado por observação e marcação manual. A temperatura de ignição foi obtida utilizando-se um sistema de aquisição junto a um termopar sobre a superfície da amostra e verificando-a no momento da chama aparente;

- f. Término dos testes: os ensaios eram finalizados 2 minutos após sinais de fim da combustão ou, caso não houvesse ignição, 10 minutos após o início do ensaio.

A Figura 3.16 ilustra o ensaio de reação ao fogo do bio-concreto de madeira em andamento.



Figura 3.16- Ensaio de reação ao fogo do bio-concreto de madeira

4 Resultados e discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em cada etapa do programa experimental, bem como a discussão do que eles representam no estudo da estabilidade térmica e reação ao fogo do bio-concreto de madeira.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Serragem de madeira

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

Os valores de massa específica aparente (γ_a), absorção de água (A) e teor de umidade (U) estão apresentados na Tabela 4.1. Estes ensaios foram realizados com a serragem tratada em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em concentração de 0,73%, para que a dosagem do bio-concreto de madeira fosse melhor realizada.

Tabela 4.1- Valores de massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade referentes ao bio-agregado de madeira.

| γ_a (g/cm ³) | A (%) | U (%) |
|---------------------------------|-------|-------|
| 0,58 | 80% | 12,50 |

Pinto (2019), utilizando as mesmas metodologias de ensaios e o material proveniente da mesma serraria com as espécies de madeira iguais, obteve resultados similares, com uma variação um pouco maior no valor de absorção de água. A autora obteve os valores de massa específica aparente de 0,60 g/cm³, absorção de água de 103,14% e teor de umidade de 11,21%. Essa diferença de resultados pode ser explicada pelo fato de que neste trabalho estas propriedades físicas da serragem de madeira foram determinadas após receber tratamento alcalino, enquanto Pinto (2019) realizou esta caracterização com a serragem sem tratamento. Observa-se, portanto, que o tratamento alcalino reduz a absorção de água da serragem e conseqüentemente a quantidade de água a entrar na mistura, pois ela obtura os poros da superfície da serragem (ver Figura 4.5 c).

4.1.1.2 Composição química

A Tabela 4.2 apresenta o resultado da composição química da serragem de madeira utilizada neste trabalho.

Tabela 4.2- Composição química do bio-agregado de madeira

| Componentes | Quantidade |
|--------------------|-------------------|
| Celulose | 38,82 % |
| Hemicelulose | 22,78 % |
| Lignina | 32,48 % |
| Extrativos | 5,92 % |

Analisando as porcentagens dos biopolímeros componentes da madeira, observou-se que a quantidade de extrativos (5,92%) está dentro dos limites propostos por Klock e Andrade (2013), pelo *Forest Products Laboratory* (2010) e por Pereira *et al.* (2003). Os teores de lignina (32,48%) encaixam-se nos limites indicados por Mazzanti (2015), Rowel *et al.* (2005), Thomas (2004) e Pereira *et al.* (2003). Já a quantidade de celulose (38,82%) e hemicelulose (22,78%) foi um pouco abaixo ou muito próxima do limite inferior das porcentagens sugeridas pelos autores acima citados.

É importante citar que a composição química apresentada na Tabela 4.2 é resultado de uma mistura de quatro diferentes espécies de madeira, entre elas uma conífera e três dicotiledôneas. Os resultados fora dos limites apresentados por outros autores podem ser justificados pela variabilidade natural de cada espécie, bem como por se tratar de uma mistura de quatro delas. Pereira *et al.* (2003) afirmam que alguns fatores podem afetar a composição química da madeira, como sua origem geográfica, gênero e espécie.

4.1.1.3 Análise termogravimétrica

A Figura 4.1 apresenta as curvas TG e DTG obtidas para a serragem de madeira em estudo nas duas atmosferas de análise.

Na curva DTG em atmosfera inerte (Figura 4.1 a) pode ser observado um pico inicial até os 100 °C (Pico I), correspondente à perda de massa de 12,27 % devido à vaporização da umidade presente na amostra. O pico que ocorre aos 361 °C (Pico II) está relacionado à decomposição da celulose. Fidelis (2014) aponta que devido aos picos de decomposição da celulose e hemicelulose serem muito próximos, o pico da hemicelulose não pode ser claramente observado, sendo identificado com um “ressalto” (*shoulder*) um pouco antes do pico de decomposição da celulose, como pode-se visualizar na Figura 4.1a. Yang *et*

al. (2007) afirmam que a lignina é o componente mais resistente à degradação e, por isso, ela ocorre até altas temperaturas e não apresenta um pico de decomposição característico.

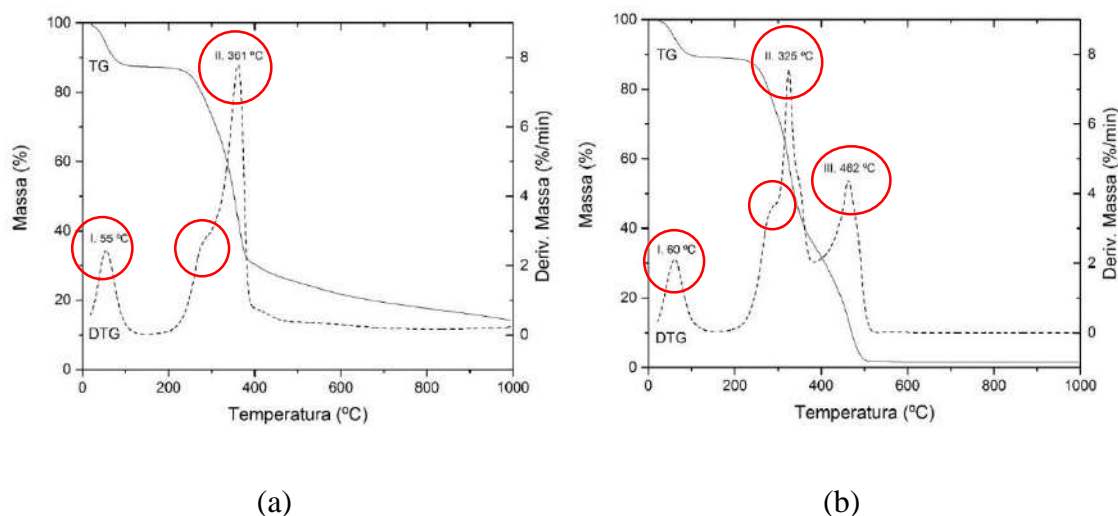


Figura 4.1- Análise termogravimétrica da serragem de madeira (a) em atmosfera de gás nitrogênio (Pirólise) (b) em atmosfera de ar (Termólise)

Analisando as curvas de TG e DTG em atmosfera oxidativa (Figura 4.1 b) é possível notar que até a temperatura de aproximadamente 400 °C elas são similares às obtidas em atmosfera de N₂, observando-se apenas que em atmosfera de ar sintético a degradação de orgânicos ocorre em uma temperatura um pouco mais baixa e mais rapidamente. O pico DTG (III) que ocorre em cerca de 462 °C corresponde à queima dos resíduos da decomposição (Figura 4.1 b).

Em termos de massa calcinada a 1000 °C, sob atmosfera inerte (N₂) ela apresentou um valor de 14,32%. Analisando-a sob ar sintético, a massa calcinada foi apenas 1,61%. Siqueira (2019) afirma que devido à combustão do material resultante da decomposição termo-oxidativa da celulose é gerada uma maior quantidade de resíduos carbonosos que queimam a maiores temperaturas, resultando em uma massa residual menor que em atmosfera inerte.

4.1.2 Materiais cimentícios

4.1.2.1 Composição química por FRX e massa específica

A composição química e a densidade dos materiais cimentícios utilizados nessa pesquisa estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Composição química por FRX e massa específica dos materiais cimentícios

| Óxidos | CP V - ARI | Cinza volante | Metacaulinita |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| CaO | 71,96 % | 2,27 % | - |
| SiO ₂ | 13,10 % | 50,46 % | 41,46 % |
| Al ₂ O ₃ | 4,86 % | 33,86 % | 48,14 % |
| Fe ₂ O ₃ | 3,84 % | 5,28 % | 5,84 % |
| SO ₃ | 3,32 % | 1,58 % | 1,25 % |
| K ₂ O | 1,07 % | 3,49 % | 0,58 % |
| SrO | 0,48 % | 0,02 % | - |
| TiO ₂ | 0,30 % | 1,23 % | 1,01 % |
| MnO | 0,15 % | 0,05 % | 0,11 % |
| BaO | - | 0,59 % | 0,40 % |
| ZrO ₂ | - | 0,11 % | 0,19 % |
| NbO | - | 0,01 % | 0,04 % |
| ZnO | - | 0,05 % | 0,02 % |
| Ga ₂ O ₃ | - | - | 0,01 % |
| Rb ₂ O | - | 0,03 % | - |
| Y ₂ O ₃ | - | 0,01 % | - |
| PF* | 0,94 % | 0,99 % | 0,96 % |
| Massa específica | 3,09 g/cm³ | 1,89 g/cm³ | 2,51 g/cm³ |

*Perda ao fogo

4.1.2.2 Análise granulométrica

A Figura 4.2 ilustra as curvas granulométricas do cimento, metacaulinita e cinza volante.

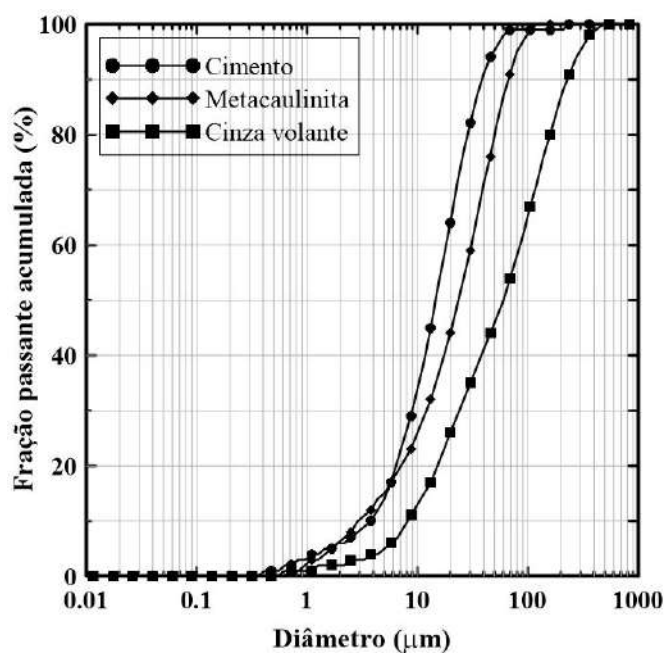


Figura 4.2- Curvas granulométricas dos materiais cimentícios

4.1.2.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica da pasta de cimento, metacaulinita e cinza volante com 7 dias de cura é apresentada nas curvas de TG e DTG na Figura 4.3. A curva TG teve sua massa normalizada, sendo transformada em 100 % após a isoterma de 35 °C. De maneira geral, a decomposição da pasta comportou-se da seguinte maneira: a desidratação da etringita, assim como a volatilização da água quimicamente combinada na formação de C-S-H e/ou aluminatos hidratados acontecem até temperaturas próximas a 370 °C, seguida da volatilização da água de composição do hidróxido de cálcio (pico III) até aproximadamente 460 °C e do dióxido de carbono decorrente da dissociação do carbonato de cálcio (pico IV), que acontece até os 1000 °C. Este comportamento é típico de materiais cimentícios (TAYLOR, 1997).

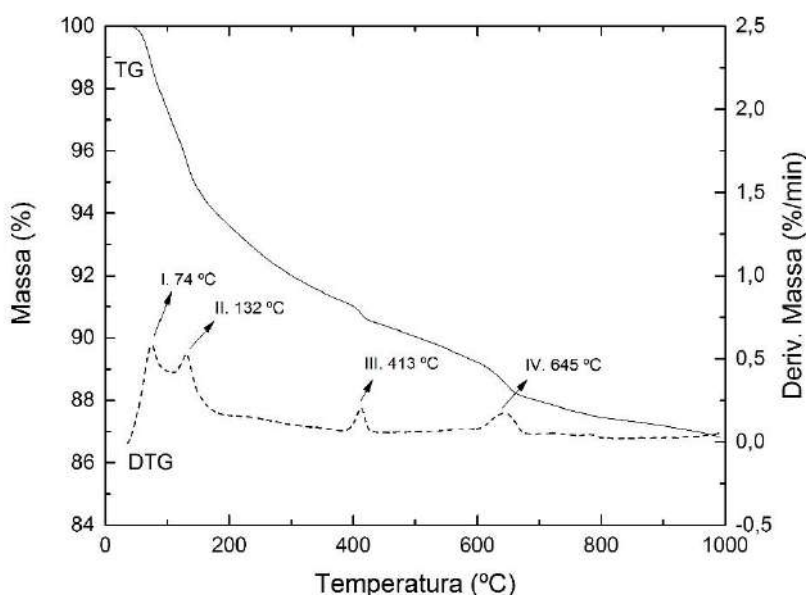


Figura 4.3- Análise termogravimétrica da pasta de cimento e pozolanas

4.2 Pré-tratamento da serragem de madeira

A determinação do tipo de pré-tratamento a ser realizado na serragem foi feita a partir dos resultados de resistência à compressão uniaxial de bio-concretos de madeira com 40% em volume de serragem e matriz de cimento.

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos bio-concretos produzidos com bio-agregados de madeira com os três tratamentos estudados, para as idades de 7 e 28 dias, estão resumidos na Tabela 4.4. Os valores representam uma média de cinco amostras para cada configuração e entre parênteses são apresentados os valores de coeficiente de variação. A Figura 4.4 apresenta as curvas típicas de tensão *versus* deformação dessas amostras.

Tabela 4.4- Resistência mecânica do bio-concreto com diferentes tratamentos de serragem, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| Tratamentos | Idade (dias) | Resistência à compressão (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) |
|-------------|--------------|--------------------------------|------------------------------|
| TERM-80 | 7 | 8,72 (1,80) | 2,02 (10,32) |
| | 28 | 8,90 (4,35) | 2,04 (7,20) |
| ALC-1IMER | 7 | 6,25 (5,54) | 1,58 (5,44) |
| | 28 | 7,08 (13,01) | 2,21 (6,60) |
| ALC-2IMER | 7 | 9,95 (4,97) | 2,25 (11,32) |
| | 28 | 10,51 (5,27) | 2,28 (7,87) |

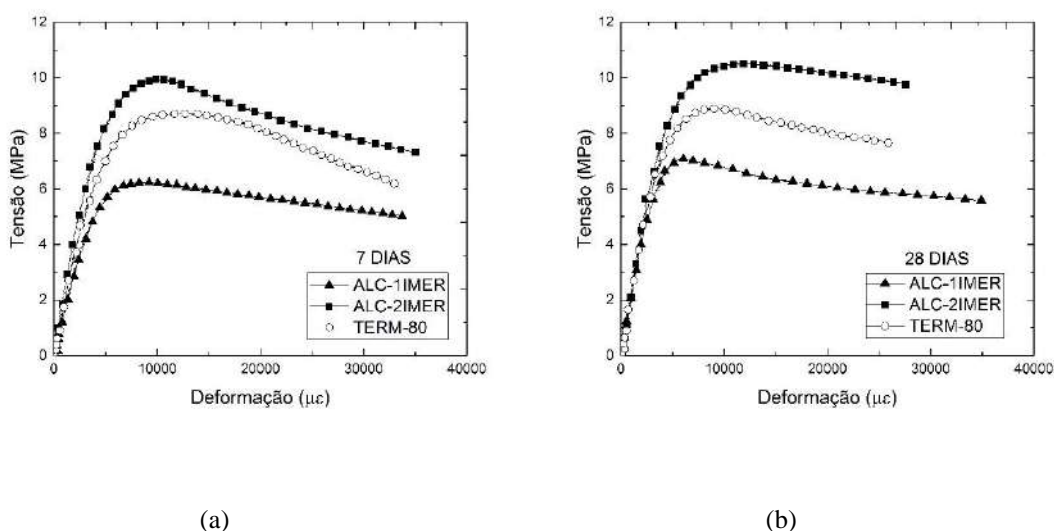


Figura 4.4-Curvas tensão x deformação para diferentes tratamentos de serragem (a) 7 dias (b) 28 dias

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que aos 7 dias, o bio-concreto atinge em média 88,28%, 97,98% e 94,67% da resistência à compressão aos 28 dias para os tratamentos ALC-1IMER, TERM-80 e ALC-2IMER, respectivamente. Andreola *et al.* (2019) afirmam que este comportamento pode ser atribuído ao uso de cimento Portland de alta resistência inicial (CP V –ARI) aliado ao cloreto de cálcio que acelera o processo

de hidratação do cimento, liberando hidróxido de cálcio de forma precoce que reage rapidamente com a sílica. Os valores de módulo de elasticidade aos 7 dias apresentam a mesma tendência. Para os três tratamentos na ordem supracitados, o bio-concreto já atinge 71,49%, 99,02% e 98,68% da rigidez observada aos 28 dias.

O tratamento ALC-2IMER apresentou o maior valor de resistência à compressão em ambas as idades. A Figura 4.4 mostra que aos 28 dias, para este tratamento, a resistência é 32,63% maior que ALC-1IMER e 15,32% maior que TERM-80. O tratamento alcalino funciona removendo os extrativos da madeira, bem como na dissolução de produtos da hemicelulose que retardam a pega do bio-concreto. Um segundo ciclo de imersão potencializa este efeito, sendo capaz de extrair uma quantidade maior de substâncias solúveis da serragem e justificando, assim, o incremento na resistência à compressão.

Em se tratando dos tratamentos alcalinos, Castro *et al.* (2014) realizaram um estudo e afirmam que a combinação do aditivo cloreto de cálcio, na porcentagem de 3% em relação à massa de cimento, com partículas de madeira carbonatadas pelo tratamento com hidróxido de cálcio apresentou maior resistência à compressão. O fenômeno da carbonatação ocorre na superfície das partículas e trata-se de uma “agressão” físico-química à estrutura da fibra que modifica as propriedades de ligação do cimento à superfície da madeira. O tratamento alcalino pode degradar e extrair uma maior quantidade de substâncias solúveis (extrativos) da madeira. Portanto, um incremento nas propriedades mecânicas é esperado.

A Figura 4.5, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), ilustra a superfície da madeira com os tratamentos TERM-80, ALC-1IMER e ALC-2IMER.

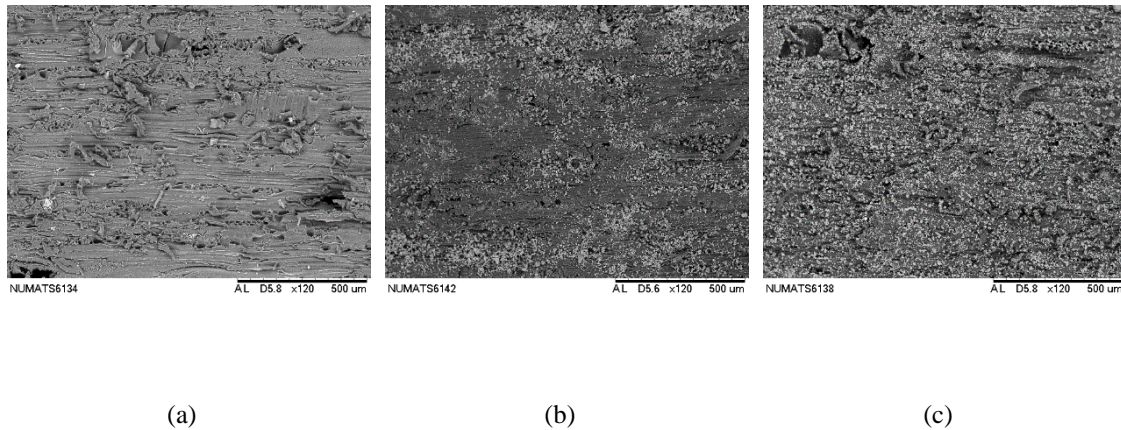


Figura 4.5- Superfície da serragem de madeira com diferentes tratamentos obtidas por MEV (a) TERM-80 (b) ALC-1IMER (c) ALC-2IMER

Pode-se observar a impregnação de hidróxido de cálcio à superfície da partícula de madeira (Figura 4.5 b e c), tendo a tratada com 2 ciclos de lavagem uma maior quantidade presente em suas fibras. A Figura 4.6 apresenta através do EDS (Espectroscopia por energia dispersiva) os elementos presentes na superfície da amostra de serragem submetida ao tratamento alcalino, mostrando a presença em maior quantidade de cálcio e oxigênio.

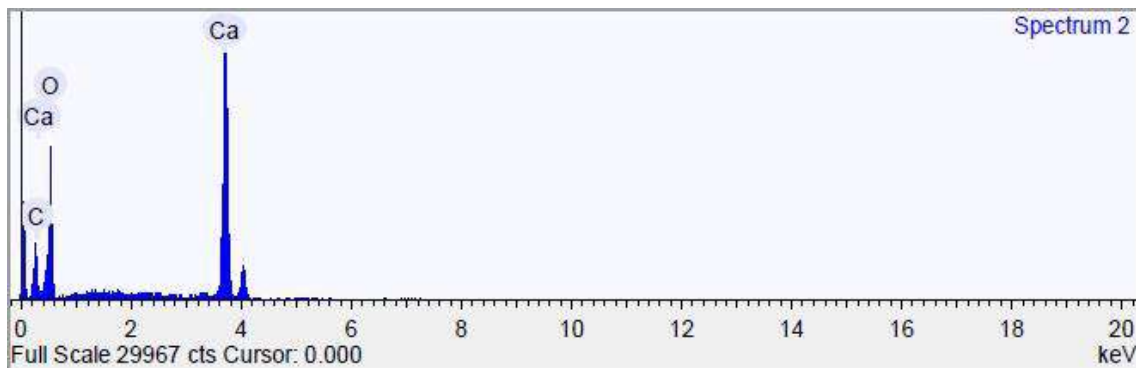


Figura 4.6 - EDS da serragem de madeira tratada com Ca(OH)_2

Deve-se ressaltar que a eficiência ou não de um tratamento para a retirada de extrativos da madeira vai depender da espécie da madeira, do tempo de imersão em água ou solução alcalina, do número de ciclos de lavagens, da temperatura da água, do tipo e concentração do soluto utilizado, entre outras variáveis. Caldas *et al.* (2019) produziram um bio-concreto de madeira, com serragem de madeira macia e com uma matriz composta de cimento e pozolanas, e obtiveram valores de resistência à compressão inferiores em relação a este trabalho, provando que ao variar a espécie da madeira, métodos alternativos de tratamento devem ser analisados.

Apesar dos três tratamentos estudados mostrarem-se satisfatórios na retirada de extrativos da madeira, em termos de resistência à compressão do bio-concreto de madeira, o alcalino ALC-2IMER revelou-se o mais eficiente por potencializar, através de um segundo ciclo de imersão, a ação da solução de hidróxido de cálcio na retirada de extrativos e dissolução de produtos da hemicelulose da madeira e foi, portanto, escolhido para a produção dos bio-concretos para o estudo de estabilidade térmica e reação ao fogo.

4.3 Caracterização dos bio-concretos de madeira

Antes de serem submetidos à altas temperaturas para avaliação de sua estabilidade térmica, o bio-concreto de madeira foi analisado em termos de trabalhabilidade, massa específica aparente e condutividade térmica.

4.3.1 Espalhamento e massa específica aparente

A Figura 4.7 mostra os espalhamentos obtidos para os bio-concretos com teores de 40, 50 e 60%, cujos valores foram 190, 195 e 190 mm respectivamente. A mistura de 60%, apesar de possuir uma menor quantidade de pasta cimentícia, o alto teor de biomassa acarreta em uma elevada formação de bolhas que dá mais trabalhabilidade ao bio-concreto, e espalhamento similar às demais misturas. Deve-se ressaltar que para todas as misturas não houve segregação dos bio-agregados e da pasta cimentícia e a trabalhabilidade foi suficientemente boa para a moldagem dos corpos de prova apenas por vibração mecânica.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.7- Espalhamentos obtidos para as misturas de bio-concreto (a) 40% de serragem (b) 50% de serragem (c) 60% de serragem

Os valores de massa específica aparente dos bio-concretos produzidos estão apresentados na Tabela 4.5 junto aos coeficientes de variação entre parênteses. A massa específica varia de 1,11 à 0,63 g/cm³, apresentando uma redução de aproximadamente 23% e 43% do BCM40 para os BCM50 e BCM60, respectivamente. De acordo com a Rilem (1978), as três misturas de bio-concreto podem ser classificadas como leves, uma vez que apresentam valor de densidade inferior a 1,80 g/cm³.

Tabela 4.5- Massa específica aparente dos bio-concretos, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| Teores de biomassa | Massa específica aparente (g/cm³) |
|---------------------------|---|
| 40% | 1,11 (2,14) |
| 50% | 0,85 (1,55) |
| 60% | 0,63 (1,78) |

No desenvolvimento de bio-concretos, pesquisadores têm encontrado valores semelhantes de densidade, havendo pequenas variações devido à natureza e espécie do bio-agregado, utilização de materiais pozolânicos na matriz cimentícia, relação a/c, condições de mistura e adensamento, etc. Da Gloria (2015) obteve, para um compósito cimento-madeira com teor de biomassa de 45% e a/c de 0,40, um valor de massa específica aparente de 1,25 g/cm³. Para o caso onde o bio-agregado é bambu, Andreola (2017) encontrou um valor de 1,19 g/cm³ para um bio-concreto com 45% de teor de biomassa, a/c de 0,40 e matriz composta apenas de cimento e bio-agregado. Da Silva (2019) produziu bio-concreto com 45% de partículas de bambu, relação a/c de 0,40 e obteve um valor dessa propriedade de 1,13 g/cm³.

4.3.2 Condutividade térmica

Os resultados de condutividade térmica dos bio-concretos de madeira são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Condutividade térmica dos bio-concretos de madeira, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| Teores de biomassa | Condutividade térmica (W/mK) |
|--------------------|------------------------------|
| 40% | 0,47 (6,80) |
| 50% | 0,36 (3,43) |
| 60% | 0,29 (9,48) |

A Figura 4.8 ilustra a tendência de decréscimo nos valores de condutividade térmica com a diminuição da densidade do bio-concreto de madeira.

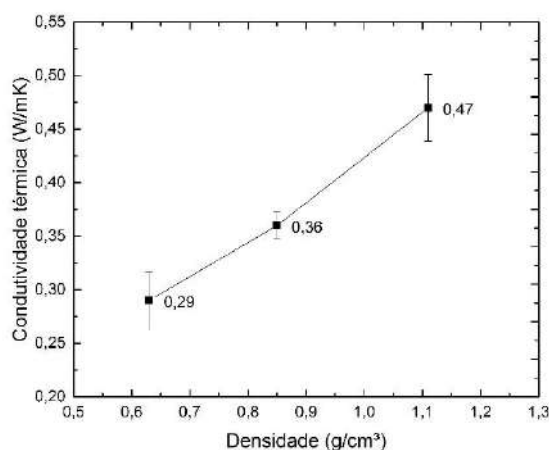


Figura 4.8- Condutividade térmica dos bio-concretos em função da densidade

Analisando os resultados expostos na Tabela 4.6 e Figura 4.8 é possível notar que o aumento no teor de biomassa das misturas, e conseqüente diminuição de densidade, acarreta numa diminuição de condutividade térmica do material.

Bederina *et al.* (2007) estudaram os efeitos da adição de serragem de madeira na condutividade térmica de concretos e também mostraram que o aumento do teor de biomassa na mistura resulta numa diminuição de sua condutividade térmica. Os autores afirmam que tornar o concreto mais leve, e menos condutor de calor, com a adição de serragem de madeira representa um fenômeno complexo que envolve tanto a porosidade específica dos agregados de madeira quanto a porosidade complementar da matriz e das interações madeira-matriz.

Kim *et al.* (2003) afirmam que, para todos os concretos, a porosidade da matriz, e consequentemente sua condutividade térmica, depende de fatores como: idade do compósito, proporção de agregados, quantidade de cimento, proporção de finos, relação água/cimento, tipo de aditivo, temperatura, umidade da amostra, preparação da amostra, etc.

Além disso, uma porosidade adicional pode ser gerada pela serragem durante o processo de mistura, uma vez que foi observado que quanto maior o teor de biomassa, maior a quantidade de bolhas no bio-concreto.

Da Gloria (2015) conduziu ensaios de condutividade térmica em compósitos cimento – madeira com teores de biomassa de 45, 50 e 60% e obteve valores de condutividade térmica de 0,54, 0,46 e 0,22 W/mK. Os resultados são similares aos obtidos nesta pesquisa e superiores para os teores de 45 e 50% que podem ser justificados pelo método de prensagem adotado no adensamento dos bio-concretos que densifica o material, reduzindo a quantidade de poros existentes no mesmo.

Com tese em desenvolvimento, Andreola estudou a condutividade térmica de bio-concretos de bambu com teor de biomassa de 40%, variando o quantidade de cimento e a relação a/c das misturas. A autora obteve resultados que variaram de 0,507 W/mK, para misturas com 30% em volume de cimento, 30% de metacaulinita, 40% de cinza volante e a/c de 0,30, à 0,595 W/mK para misturas com 100% de cimento e a/c de 0,40, verificando que a condutividade térmica cresceu proporcionalmente com a densidade e está diretamente relacionada com a porcentagem de aglutinante na mistura.

4.4 Estabilidade térmica do bio-concreto de madeira

4.4.1 Propriedade física

4.4.1.1 Massa específica aparente

A Tabela 4.7 apresenta os valores de massa específica aparente dos bio-concretos com teores de biomassa de 40, 50 e 60% sob temperatura ambiente de 22 °C (referência) e após submetidos às temperaturas de 100, 150, 200 e 250 °C. A Figura 4.9 ilustra estes valores com a evolução da temperatura.

Tabela 4.7- Valores de massa específica aparente do bio-concreto (em g/cm³) após submissão a diferentes temperaturas, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| BCM | 22 °C | 100 °C | 150 °C | 200 °C | 250 °C |
|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 40% | 1,109 (2,14) | 1,036 (1,61) | 0,999 (0,73) | 0,970 (0,68) | 0,980 (1,11) |
| 50% | 0,854 (1,54) | 0,798 (2,03) | 0,767 (2,02) | 0,756 (1,11) | 0,759 (2,96) |
| 60% | 0,633 (1,78) | 0,603 (1,96) | 0,583 (2,74) | 0,582(0,96) | 0,404 (4,47) |

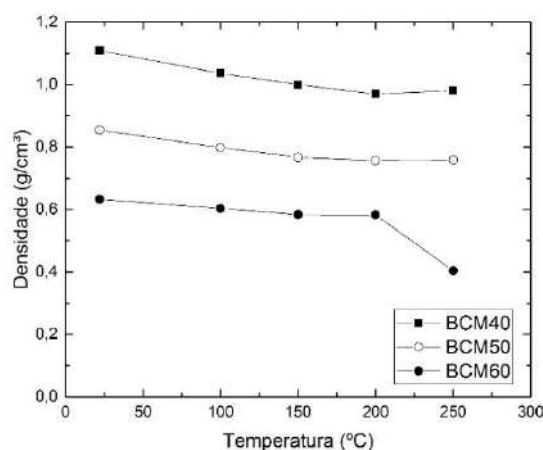


Figura 4.9- Gráfico de densidade do bio-concreto com a evolução da temperatura

Os resultados expostos na Tabela 4.7 mostram uma diminuição gradual no valor da densidade do bio-concreto com o aumento da temperatura. Quando a temperatura de referência (22 °C) é comparada com as demais, as densidades das misturas de BCM40 apresentam reduções de 6,6; 9,9; 12,5 e 11,6% referentes às temperaturas de 100, 150, 200 e 250 °C. Analisando os valores referentes às misturas de BCM50, os resultados são similares aos obtidos pelo BCM40 apresentando reduções de 6,5; 10,2; 11,5 e 11,1% para as mesmas temperaturas supracitadas. Um comportamento análogo é observado a partir dos 200 °C para estas duas misturas, não havendo variação significativa nos valores de densidade dos 200 aos 250 °C. O BCM60 se comporta de forma diferente, uma vez que apresenta reduções em densidade de 4,7; 7,9 e 8,1 % para as temperaturas de 100, 150 e 200 °C respectivamente, mas quando submetido à temperatura de 250 °C apresenta uma diminuição de densidade de 36,2% em relação ao mesmo à temperatura ambiente e 30,7% em relação ao submetido a 200 °C. Essa queda mais acentuada na densidade confirma o que foi proposto pela termogravimetria da serragem, uma vez que ela mostra que a partir dos 250 °C há uma maior perda de massa da madeira e o bio-concreto com 60% de serragem apresenta, portanto, um comportamento semelhante.

A Figura 4.10, uma micrografia eletrônica de varredura de uma amostra de BCM60 submetida à 250 °C, ilustra a estrutura porosa deste material, bem como a degradação térmica que ocorre na serragem de madeira, o que justifica uma maior variação no valor de densidade.

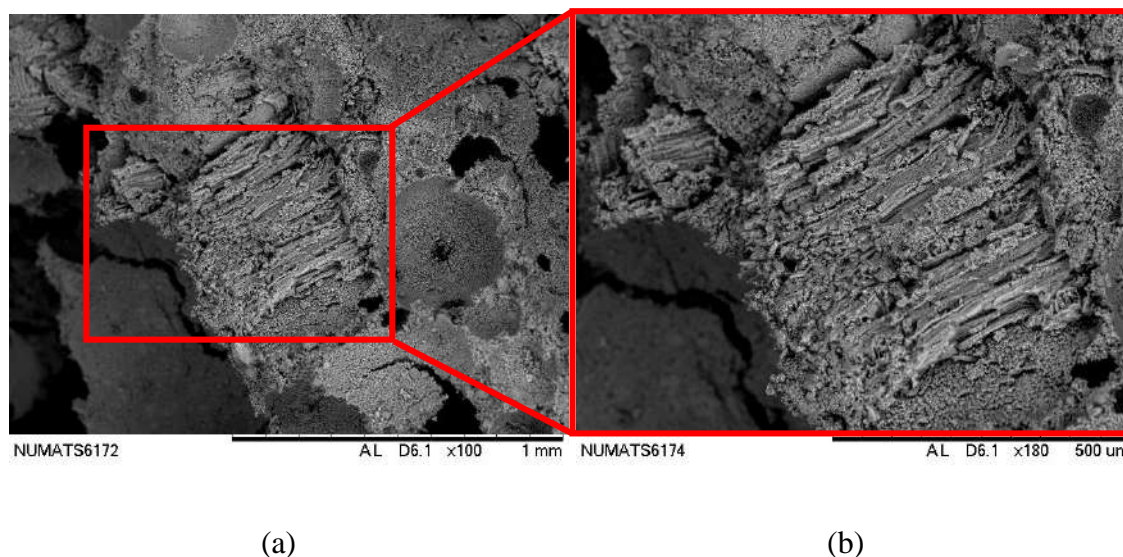


Figura 4.10- MEV de amostra de BCM60 submetido à 250 °C (a) estrutura porosa (b) detalhe da degradação da serragem de madeira

Uma análise mais detalhada de micrografias será abordada na seção 4.4.3 deste trabalho.

4.4.2 Comportamento tensão x deformação

4.4.2.1 Compressão uniaxial

Os bio-concretos de madeira foram avaliados sob esforços de compressão uniaxial após 28 dias de cura seca e depois de serem submetidos às diferentes temperaturas deste estudo. Os resultados e discussões da resistência à compressão (F_c), módulo de elasticidade (E) e o comportamento tensão *versus* deformação para os diferentes bio-concretos e temperaturas estão apresentados a seguir.

A Figura 4.11 apresenta as curvas típicas de tensão versus deformação dos bio-concretos estudados à temperatura ambiente de 22 °C, tratados como referência deste trabalho. É possível notar, a partir desta figura, uma região inicial com comportamento linear elástico seguido por um acréscimo de tensão marcado por uma não linearidade até que a resistência máxima de ruptura é atingida. Observa-se também um comportamento pós-pico com redução gradual da tensão e aumento da deformação. Este efeito mostra-se

menos acentuado com o aumento do teor de biomassa na mistura, com elevados valores de deformação para uma pequena variação de tensão.

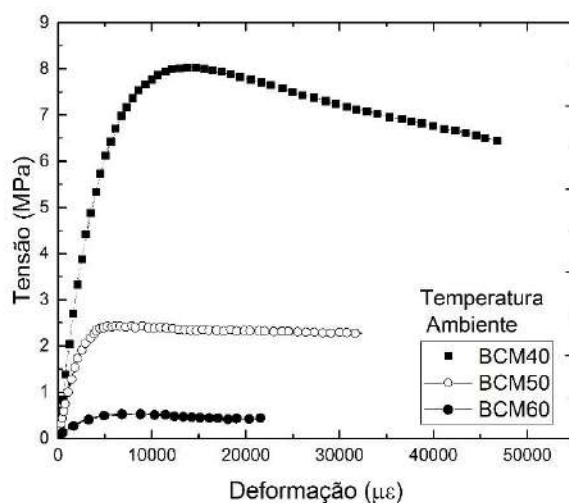


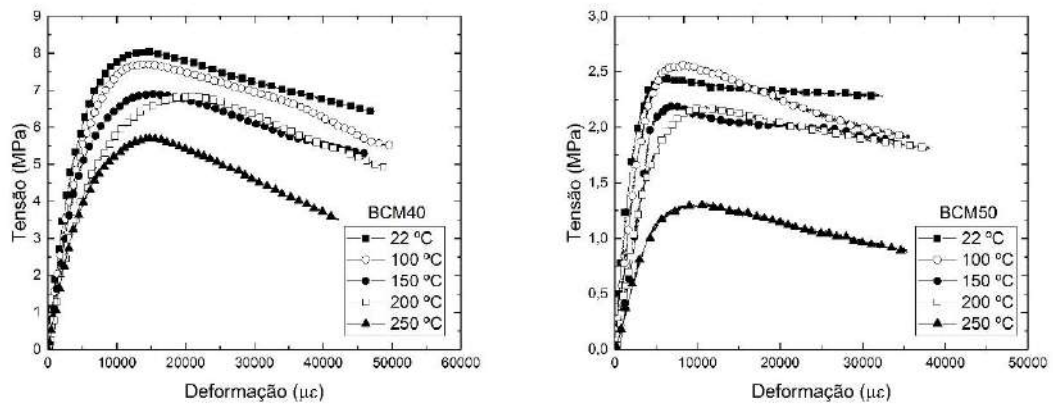
Figura 4.11- Curvas típicas de tensão *versus* deformação dos bio-concretos a temperatura ambiente

Fazendo uma análise da resistência à compressão entre os teores de biomassa, o BCM40 apresenta valor de resistência 70% e 93% superior quando comparado ao BCM50 e BCM60, respectivamente. Esse comportamento também se refletiu nos valores de módulo de elasticidade do material, que reduziram em 50% e 90% para o BCM50 e BCM60 em relação ao BCM40. A partir desses resultados pode-se concluir que a redução do volume de cimento e aumento da quantidade de agregado de madeira diminuem a resistência à compressão e módulo de elasticidade do bio-concreto.

Da Gloria (2015) produziu compósitos cimento-madeira com frações volumétricas de serragem de madeira de 45, 50 e 60% e obteve resultados de resistência à compressão de 15,97, 9,46 e 3,55 MPa, respectivamente. Os valores apresentados são superiores aos obtidos nesta pesquisa e justificam-se pelo método de prensagem utilizado, que densifica e comprime o material durante o processo de moldagem.

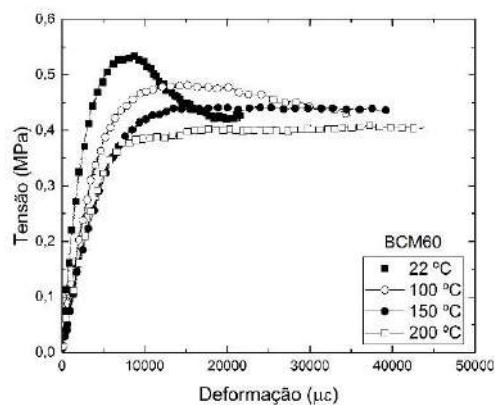
A Figura 4.12 apresenta as curvas tensão *versus* deformação para as diferentes temperaturas de estudo e teores de biomassa estudados. Os valores de carga máxima de compressão e módulo de elasticidade do bio-concreto são reduzidos com o aumento da temperatura e do teor de biomassa na mistura. Entretanto, para todas as frações de biomassa e temperaturas estudadas, o bio-concreto apresenta grande capacidade de

deformação sem fragmentar-se. Trata-se, portanto, de um material capaz de absorver energia, mesmo após submissão a temperaturas acima da ambiente, e quando sobrecarregado, deforma-se bastante antes da ruptura.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.12- Curvas típicas da evolução de tensão *versus* deformação para diferentes temperaturas (a) BCM40 (b) BCM50 (c) BCM60

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios de resistência à compressão dos bio-concretos. Com base nos valores da Tabela 4.8, a resistência à compressão *versus* a temperatura dos bio-concretos são ilustrados na Figura 4.13.

Tabela 4.8- Valores médios de resistência à compressão dos bio-concretos (MPa), com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| Temperatura | BCM40 | BCM50 | BCM60 |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 22 °C | 8,18 (9,08) | 2,48 (6,24) | 0,53 (7,63) |
| 100 °C | 7,86 (8,32) | 2,52 (4,78) | 0,51 (10,29) |
| 150 °C | 6,96 (4,57) | 2,23 (5,45) | 0,46 (15,37) |
| 200 °C | 6,87 (3,01) | 2,18 (4,41) | 0,43 (20,56) |
| 250 °C | 5,70 (0,84) | 1,38 (15,27) | 0,07 (8,66) |

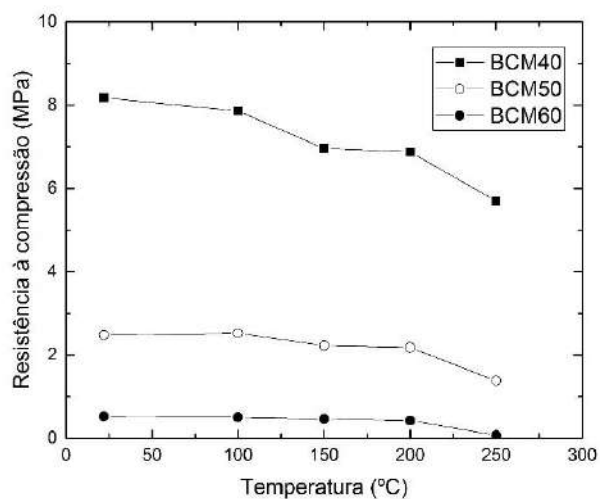


Figura 4.13- Evolução da resistência à compressão com o aumento da temperatura dos bio-concretos

Analisando a evolução da resistência à compressão com o aumento da temperatura nota-se que seu valor é reduzido. As misturas de BCM40 tem seus valores de resistência à compressão reduzidos em 3,9; 14,9; 16,0 e 30,3% comparando-se a referência (22 °C) com as temperaturas de 100, 150, 200 e 250 °C respectivamente. Para as amostras de BCM50 houve um acréscimo de 1,6% na resistência da temperatura de 100 °C em relação à referência e reduções de 10,1; 12,1 e 44,35% quando comparados às amostras submetidas à 150, 200 e 250 °C respectivamente. Finalmente, os BCM60 obtiveram reduções de 3,8; 13,2; 18,9 e 86,8% quando comparados às temperaturas de estudo acima citadas. Observa-se para todas as misturas que a queda de resistência é mais acentuada

para os bio-concretos submetidos à 250 °C, tendo seus valores reduzidos em 17,0; 36,7 e 83,7%, comparando com os obtidos à 200 °C, para as misturas BCM40, BCM50 e BCM60 respectivamente. Essa queda de resistência aos 250 °C era esperada, já que a termogravimetria da serragem de madeira mostrou uma grande perda de massa a partir desta temperatura, e portanto, quanto maior a fração volumétrica do bio-agregado, maior foi a perda em resistência.

A Tabela 4.9 apresenta os valores médios de módulo de elasticidade dos bio-concretos com a evolução da temperatura. Com base nos valores da Tabela 4.9, o módulo de elasticidade *versus* a temperatura dos bio-concretos são ilustrados na Figura 4.14. Não foi possível obter o valor de módulo de elasticidade do BCM60 submetido à 250 °C, uma vez que o material não tinha resistência suficiente para segurar os LVDT's e fazer as leituras de deformação.

Tabela 4.9- Valores médios de módulo de elasticidade dos bio-concretos (GPa), com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| Temperatura | BCM40 | BCM50 | BCM60 |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| 22 °C | 1,66 (6,79) | 0,84 (10,71) | 0,16 (17,01) |
| 100 °C | 1,32 (2,32) | 0,62 (9,38) | 0,12 (24,07) |
| 150 °C | 1,17 (5,96) | 0,52 (23,49) | 0,07 (23,29) |
| 200 °C | 1,03 (4,01) | 0,45 (4,93) | 0,06 (9,26) |
| 250 °C | 0,97 (4,61) | 0,35 (21,86) | - |

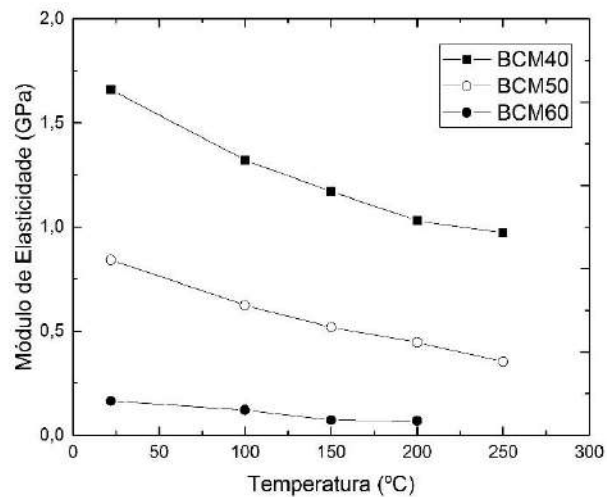


Figura 4.14- Evolução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura dos bio-concretos

Na análise do módulo de elasticidade pode ser observado que a rigidez dos bio-concretos é mais penalizada que a resistência à compressão com a evolução da temperatura. Uma elevação da temperatura de 22 à 100 °C é suficiente para provocar uma redução nos valores de módulo de elasticidade de 20,5; 26,2 e 25% para os BCM40, BCM50 e BCM60 respectivamente. O aumento da temperatura acarreta no surgimento de microfissuras na estrutura do bio-concreto provocando a perda de rigidez do material. À medida que a temperatura aumenta, os bio-concretos perdem mais rigidez. Para o BCM40 as redução em módulo de elasticidade, comparando a temperatura ambiente com as temperaturas de 150, 200 e 250 °C, foram de 29,5; 37,9 e 58,4%. No caso do BCM50, para as mesmas temperaturas, os valores foram reduzidos em 38,1; 46,4 e 58,3%. Fazendo a mesma análise para o BCM60 o módulo de elasticidade foi diminuído em 56,3 e 62,5% ao se comparar os resultados de 22 °C com os obtidos a temperaturas de 150 e 200 °C. Não foi possível obter o valor de módulo de elasticidade para o BCM60 à 250 °C, uma vez que este material apresentou rigidez baixa e insuficiente para sustentar um LVDT que pudesse realizar as leituras de deformação do material. As maiores quedas em módulo de elasticidade foram para os bio-concretos produzidos com 60% de biomassa, tendo o bio-agregado nesse caso mais força para definir a baixa rigidez do material, já que há uma maior quantidade de biomassa exposta e susceptível à degradação térmica.

Baduge *et al.* (2019) produziram bio-concretos leves com agregados de cânhamo e aglutinantes com cenosferas e outros materiais pozzolânico, com densidade variando entre

1172 e 965 kg/m³. Estudando a performance mecânica desse material submetido às temperaturas de 300 °C e 600 °C, os resultados mostraram uma diminuição de resistência de até 88% e 97% e de módulo de elasticidade de 73% e 88%, para estas temperaturas estudadas respectivamente. As altas temperaturas estudadas são justificadas pelo uso das cenoferas, que são subprodutos da usina de carvão e apresentam bom desempenho ao fogo e propriedades térmicas devido à sua natureza oca cheia de gás.

Foi realizada uma análise da tenacidade para avaliar a capacidade de absorção de energia e deformação plástica das amostras. A Figura 4.15 apresenta uma curva esquemática do comportamento típico de tensão *versus* deformação apresentado pelas amostras ensaiadas neste trabalho. Foi observado um comportamento típico inicial de regime linear-elástico até o ponto A que representa a resistência à primeira fissura da matriz do bio-concreto e deformação de primeira fissura (ϵ_{pf}), seguida do surgimento de novas fissuras e rompimento da amostra com o aumento gradual da carga até atingir seu valor máximo (Ponto B). Os pontos C, D e E equivalem às tensões e deformações referentes a $3\epsilon_{pf}$, $5,5\epsilon_{pf}$ e $8\epsilon_{pf}$ respectivamente, que foram determinados para a obtenção dos índices de tenacidade (IT_1 , IT_2 e IT_3) que refletem o comportamento pós-fissuração do bio-concreto. Algumas amostras não apresentaram valor de deformação suficiente para se obter o valor de $8\epsilon_{pf}$ e IT_3 .

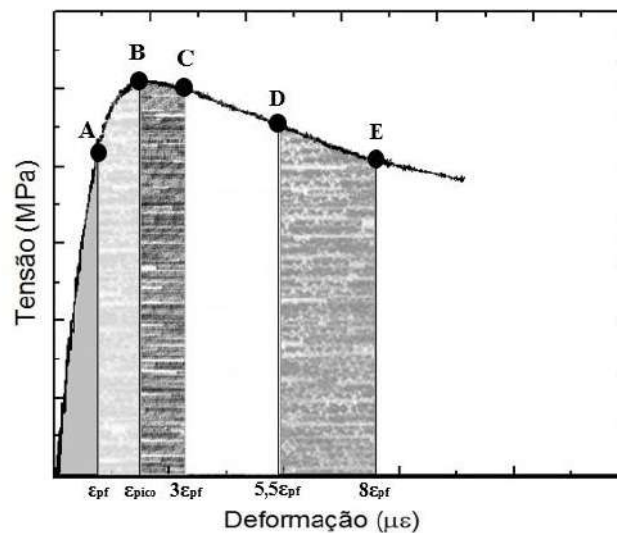


Figura 4.15 - Curva esquemática do comportamento tensão *versus* deformação do bio-concreto

A Tabela 4.10 apresenta os valores da tenacidade na primeira fissura (T_{pf}), deformação na primeira fissura (ϵ_{pf}), tenacidade no pico (T_{pico}) e deformação no pico (ϵ_{pico}) para as curvas típicas de tensão x deformação dos bio-concretos.

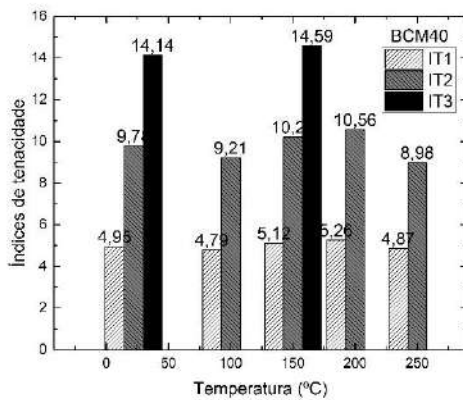
Tabela 4.10 - Tenacidade e deformação na primeira fissura e no pico das curvas típicas dos bio-concretos

| | | 22 °C | 100 °C | 150 °C | 200 °C | 250 °C |
|--------------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| BCM40 | T_{pf} (KJ/m ²) | 1,12 | 1,38 | 0,92 | 1,05 | 0,98 |
| | ϵ_{pf} (µε) | 5743,27 | 7004,10 | 5841,31 | 7113,54 | 7005,21 |
| | T_{pico} (KJ/m ²) | 4,45 | 3,82 | 4,09 | 5,42 | 3,17 |
| | ϵ_{pico} (µε) | 14491,10 | 13665,12 | 15639,50 | 20980,53 | 15171,88 |
| BCM50 | T_{pf} (KJ/m ²) | 0,24 | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,15 |
| | ϵ_{pf} (µε) | 3498,63 | 3955,77 | 5004,55 | 5300,95 | 4810,76 |
| | T_{pico} (KJ/m ²) | 0,57 | 0,70 | 0,47 | 0,87 | 0,53 |
| | ϵ_{pico} (µε) | 6301,28 | 7729,67 | 6945,92 | 10923,69 | 11023,64 |
| BCM60 | T_{pf} (KJ/m ²) | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | - |
| | ϵ_{pf} (µε) | 3937,52 | 5585,95 | 6657,54 | 5779,75 | - |
| | T_{pico} (KJ/m ²) | 0,12 | 0,28 | 0,22 | 0,12 | - |
| | ϵ_{pico} (µε) | 6637,48 | 15028,25 | 14010,49 | 8869,13 | - |

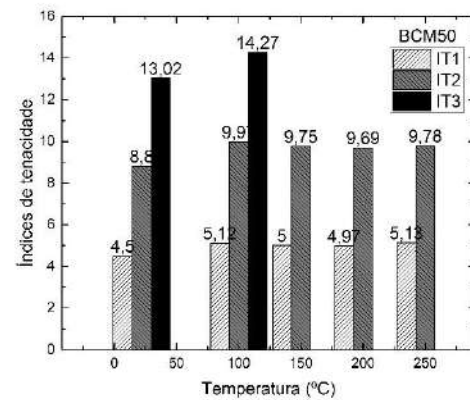
Pode-se observar uma diminuição brusca nos valores de tenacidade com o aumento do teor de biomassa, tendo os BCM 50 e BCM60 seus valores reduzidos em 78% e 95% em relação ao BCM40 aos 22 °C. Esse decréscimo é justificado pela capacidade mecânica resistiva do bio-concreto que é diminuída, uma vez que a resistência de primeira fissura

acontece a cargas mais baixas com o aumento de serragem no material. A elevação da temperatura não apresentou correlação relevante nos valores de tenacidade, apresentando valores próximos aos de referência.

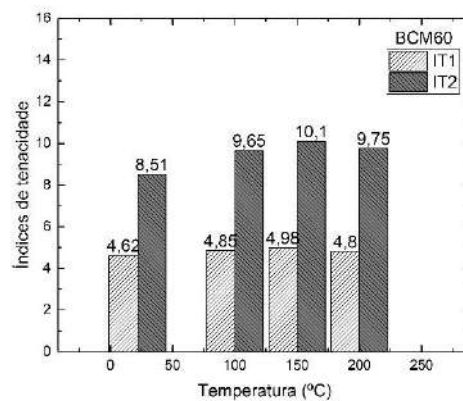
Os valores de índice de tenacidade (IT_1 , IT_2 e IT_3) foram obtidos através da relação entre as tenacidade $T_{3\epsilon}$, $T_{5,5\epsilon}$, $T_{8\epsilon}$ e a tenacidade de primeira fissura (T_{pf}) para avaliar o comportamento pós fissuração dos bio-concretos. A Figura 4.16 apresenta esses valores em função da temperatura.



(a) BCM40



(b) BCM50



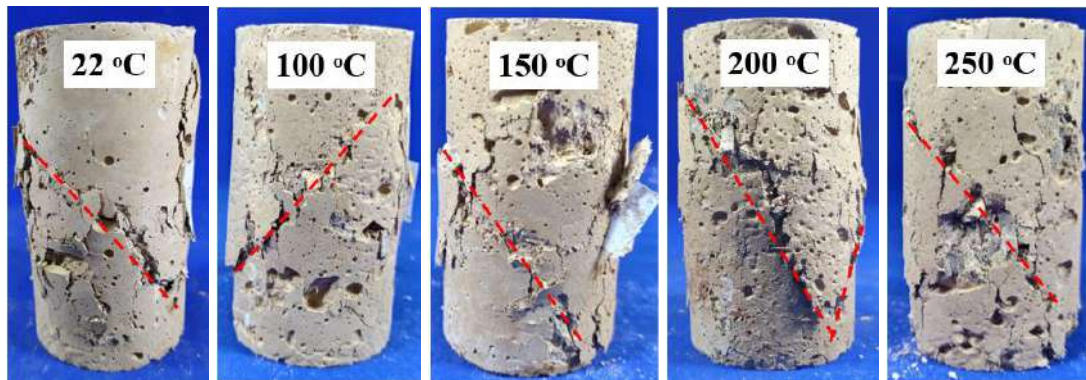
(c) BCM60

Figura 4.16- Índices de tenacidade em função da temperatura dos bio-concretos (a) BCM40 (b) BCM50 (c) BCM60

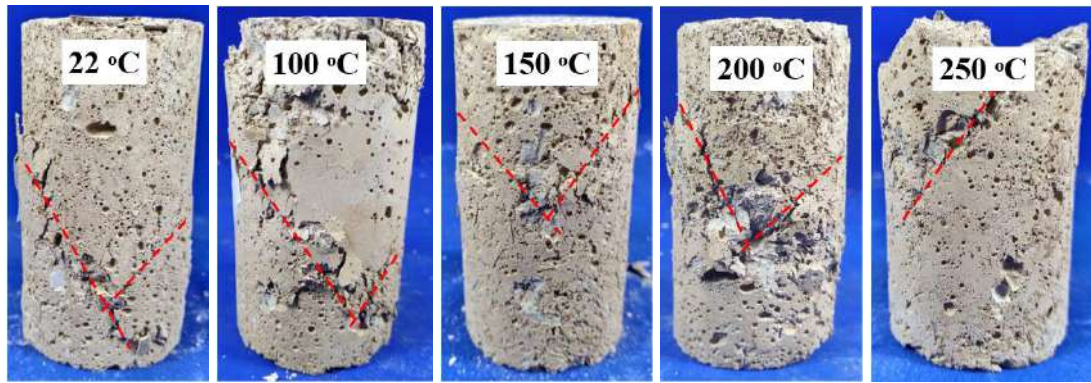
Os valores de IT_1 , IT_2 e IT_3 são similares entre si em todas as misturas, revelando que o comportamento pós-fissuração com alta capacidade de absorção de energia é preservado

e um considerável nível de resistência retida após a primeira fissura é mantido, independente do teor de biomassa. Os índices de tenacidade revelam ainda que o comportamento pós-fissuração do bio-concreto acima descrito independe da temperatura.

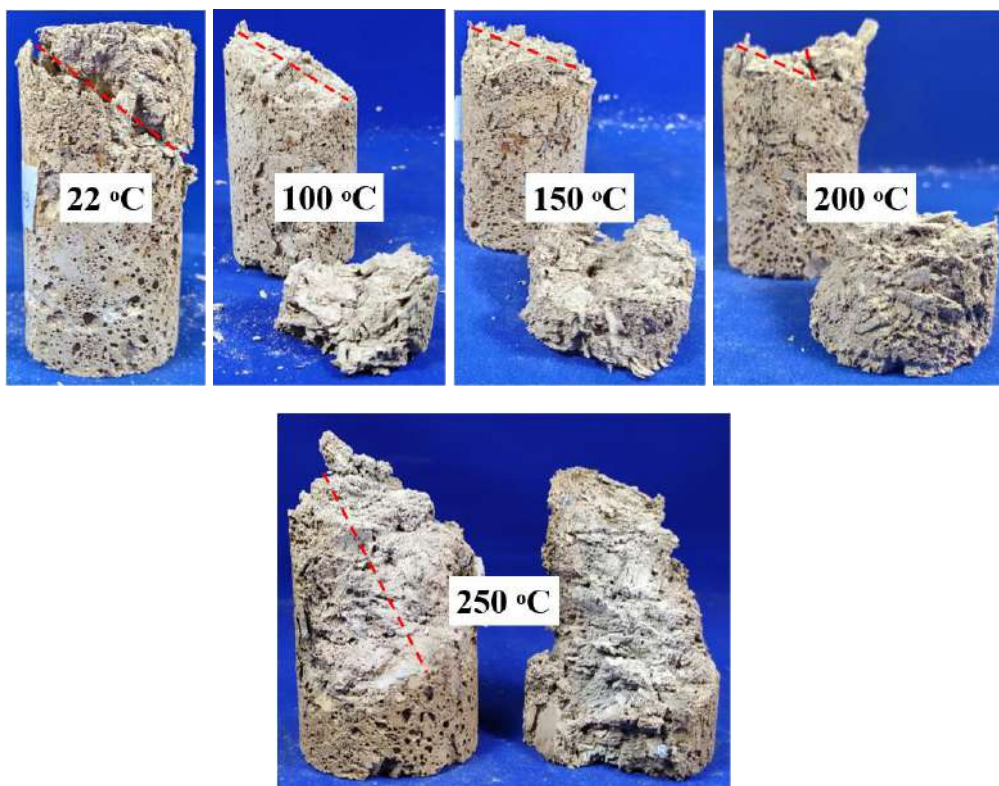
A Figura 4.17 ilustra os modos de fratura dos bio-concretos sob compressão. Segundo a NBR 5739 (2018) todos os bio-concretos apresentam ruptura do tipo cônica ou cisalhante. Para as misturas BCM40 e BCM50 todos os corpos-de-prova mantiveram-se íntegros pós ensaio, enquanto que para a mistura BCM60 ocorreu um deslocamento do material na região de ruptura. Esse comportamento de ruptura das três misturas ocorreu em todas as temperaturas estudadas e reforça que este material suporta determinados níveis de tensão com grande capacidade de deformação na fase plástica.



(a) BCM40



(b) BCM50



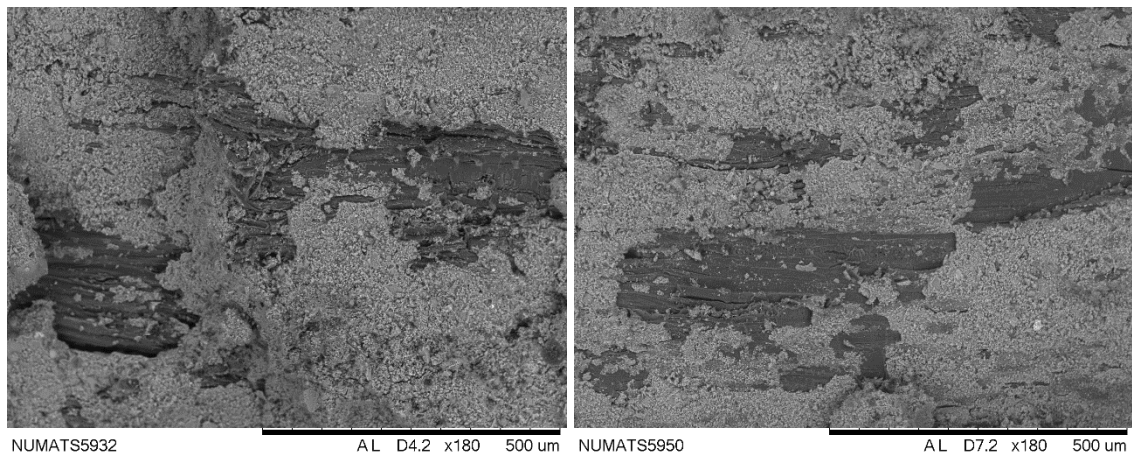
(c) BCM60

Figura 4.17- Modos de fratura do bio-concreto de madeira à 22, 100, 150, 200 e 250 °C
 (a) BCM40 (b) BCM50 (c) BCM60

4.4.3 Análise microestrutural

Os resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram a estrutura do bio-concreto com diferentes teores de biomassa submetidos às temperaturas de estudo. A interface serragem-pasta foi analisada com a evolução da temperatura.

Observando-se a Figura 4.18 nota-se a pasta de cimento aderida à partícula de madeira, a presença de microfissuras, que podem ser justificadas pelo fato das amostras serem provenientes de corpos de provas submetidos à ensaios de compressão uniaxial, e indícios de descolamentos entre a serragem e pasta. As imagens referem-se às misturas BCM40 e BCM50 sem exposição a altas temperaturas.

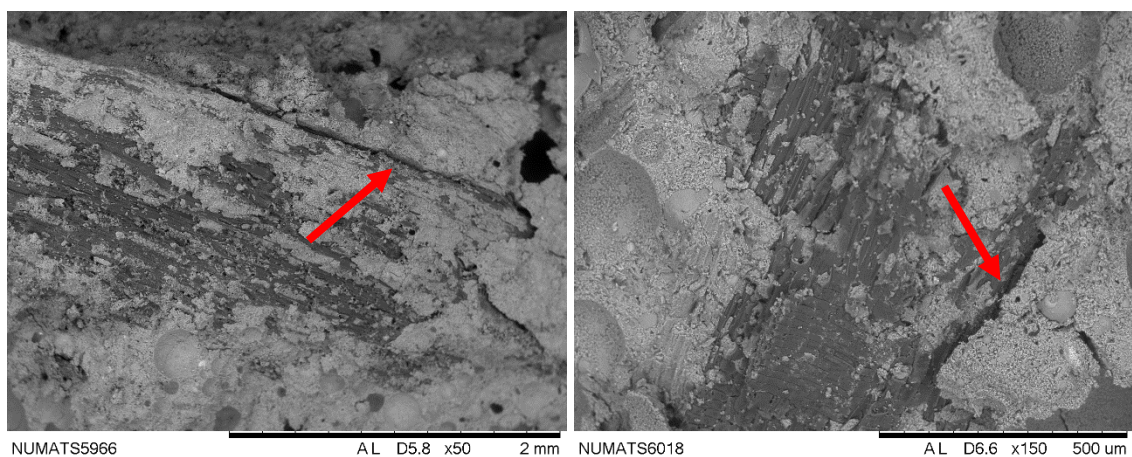


(a) BCM40

(b) BCM50

Figura 4.18- Bio-concreto de madeira em temperatura ambiente (a) BCM40 (b) BCM50

A Figura 4.19 ilustra amostras de BCM40 e BCM50 submetidas à 100 °C, onde é possível observar fissuras maiores, principalmente na região de ligação entre a serragem e a pasta.

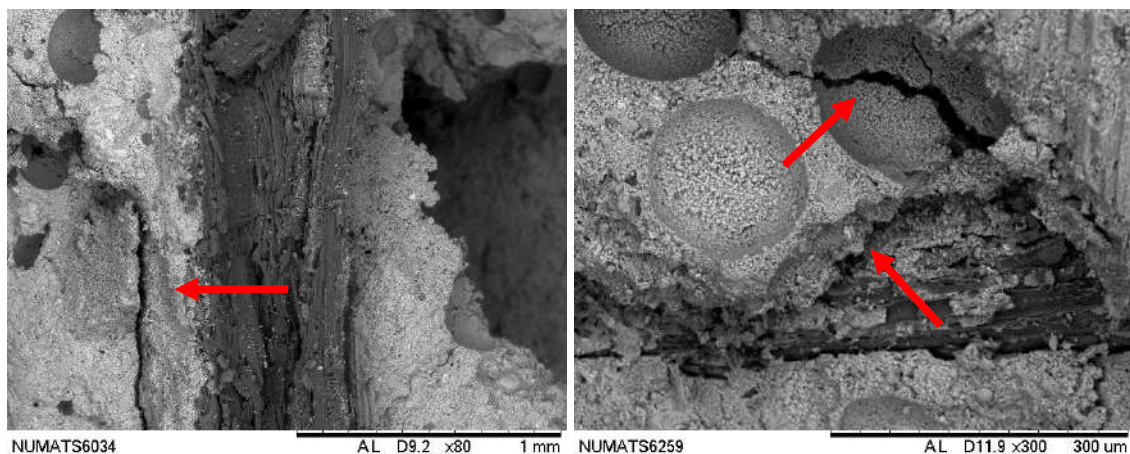


(a) BCM40

(b) BCM50

Figura 4.19- Bio-concreto de madeira à 100 °C (a) BCM40 (b) BCM50

À medida que a temperatura é elevada, as fissuras presentes no bio-concreto mostram-se cada vez maiores. Na Figura 4.20 é possível observar a presença de grandes fissuras não apenas na interface serragem-pasta (Figura 4.20 a) do BCM40 submetido à 150 °C. A Figura 4.20 b, por sua vez, mostra de forma clara a fragilidade do material na região dos poros, onde há uma maior propagação de fissuras, de um BCM50 submetido à 200 °C. De forma geral, o comportamento à 200 °C é similar ao de 150 °C com fissuras mais acentuadas.

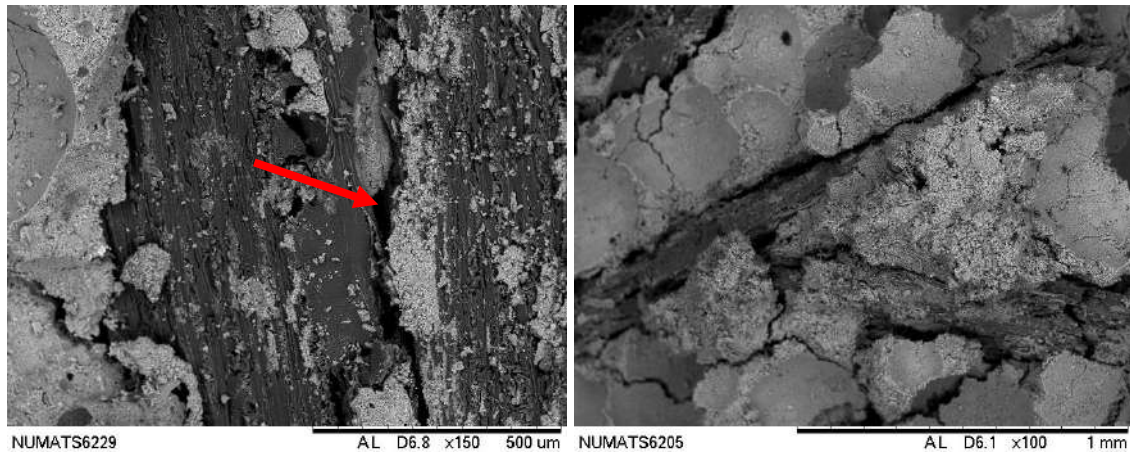


(a) BCM40 – 150 °C

(b) BCM50 – 200 °C

Figura 4.20- Bio-concreto de madeira à 150 °C e 200 °C (a) BCM40 (b) BCM50

Quando submetidos à 250 °C, temperatura em que a madeira começa a apresentar grande perda de massa, percebe-se um descolamento quase completo da serragem com a pasta e uma estrutura completamente comprometida com grandes fissuras (Figura 4.21). A grande redução no comportamento mecânico após o aquecimento à esta temperatura é consequência do alto nível de dano observado nessas amostras. As partículas de madeira perdem massa e estrutura ao serem degradadas com o aumento da temperatura e junto com uma pasta cimentícia porosa e repleta de fissuras não formam mais um composto sólido resistente.



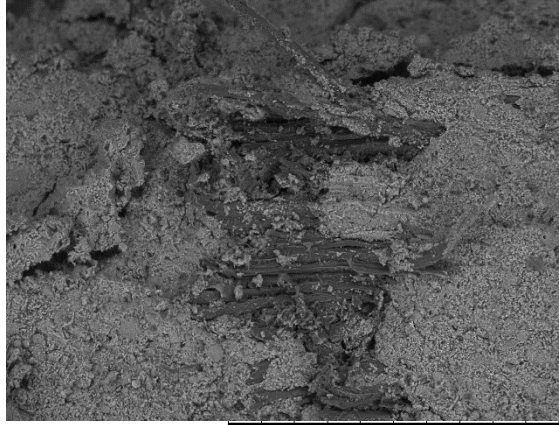
(a) BCM40

(b) BCM50

Figura 4.21- Bio-concreto de madeira à 250 °C (a) BCM40 (b) BCM50

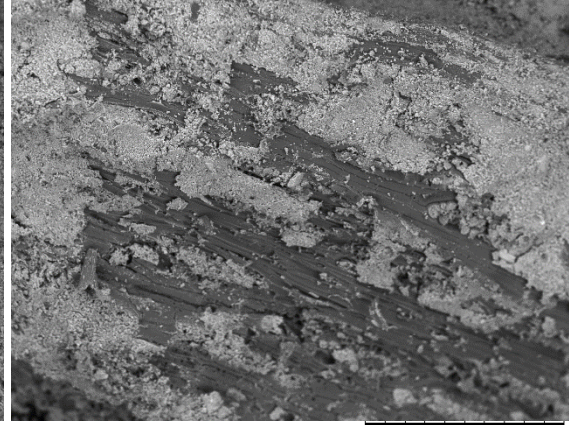
O processo de queima causa danos à superfície e estrutura da madeira. A Figura 4.22 mostra como se comporta a estrutura da serragem de madeira com a evolução da temperatura. Wilk *et al.* (2016) comentam que amostras de biomassa de madeira queimadas à temperatura de 230 °C são caracterizadas por uma estrutura tubular com superfície parcialmente celular e aberturas alongadas. A queima a temperaturas mais elevadas (de 250 a 290 °C) leva a uma degradação gradual das estruturas tubulares, como pode ser observado na Figura 4.22e com as fibras de madeira queimadas à 250 °C. As aberturas estão associadas à formação de vias para produtos gasosos, que são liberados durante a queima a partir da massa sólida de biomassa.

A remoção dos constituintes da madeira durante a carbonização à temperatura de aproximadamente 275 °C resulta na formação de uma estrutura mais aberta da madeira, onde a superfície de contato fibra a fibra reduzida é uma indicação para a diminuição das propriedades mecânicas da madeira (GOSSELINK *et al.*, 2004).



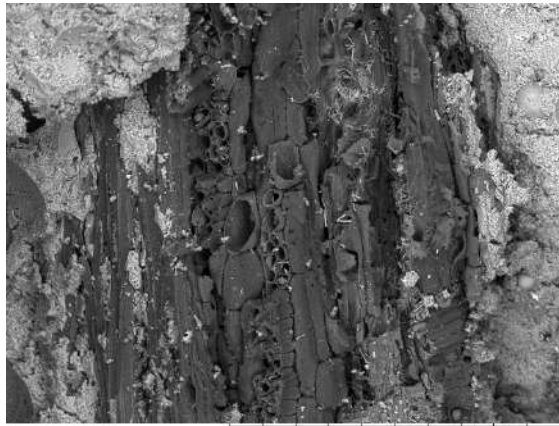
NUMATS5943 AL D4.7 x200 500 um

(a) BCM40 - 22 °C



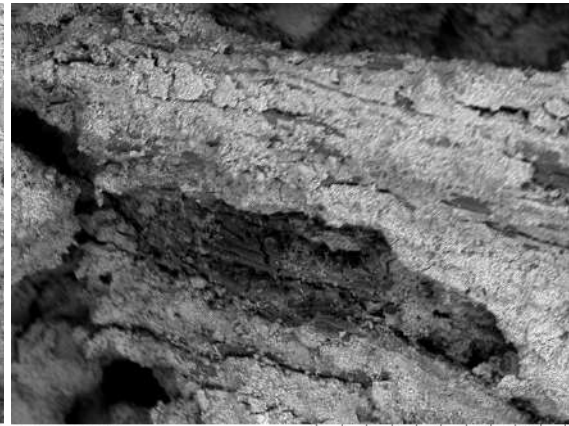
NUMATS5965 AL D5.0 x120 500 um

(b) BCM40 - 100 °C



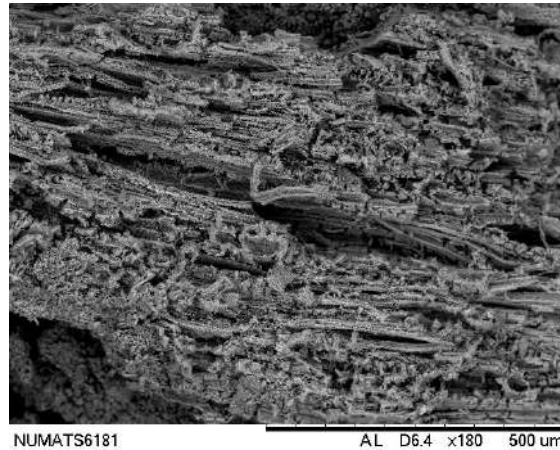
NUMATS6044 AL D8.6 x200 500 um

(c) BCM40 - 150 °C



NUMATS6104 AL D7.0 x150 500 um

(d) BCM40 - 200 °C



(e) BCM60 - 250 °C

Figura 4.22- Detalhes das fibras da madeira à (a) 22 °C (b) 100 °C (c) 150 °C (d) 200 °C (e) 250 °C

É importante ressaltar que a reprodução de imagens foi feita com amostras fraturadas de corpos de prova de uma material heterogêneo, portanto maiores investigações com observações em mais pontos do bio-concreto utilizando amostras íntegras são necessárias para aprimoramento das observações relatadas neste trabalho.

4.5 Reação ao fogo do bio-concreto de madeira

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados concernentes sobre a investigação das propriedades de combustão da serragem de madeira e do bio-concreto de madeira com diferentes teores de biomassa em sua composição. São destacadas as propriedades de HRR, EHC, TML e TTI relacionando-as com a densidade do material.

Todos os resultados obtidos no estudo de reação ao fogo foram resumidos e apresentados na Tabela 4.11, incluindo dados de espessura e densidade das amostras. Os valores exibidos representam uma média das amostras ensaiadas. Uma análise detalhada dos parâmetros é apresentada a seguir.

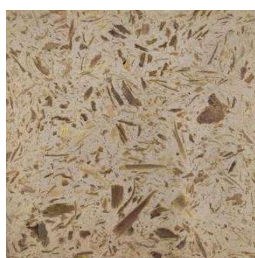
Tabela 4.11- Propriedades de combustão da serragem e bio-concretos de madeira, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

| | | SER | BCM40 | BCM50 | BCM60 | BCM70 |
|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Espessura | mm | 15 | 23,28 (4,45) | 24,44 (4,16) | 23,0 (2,91) | 29,18 (3,07) |
| Densidade | kg/m ³ | 580 | 1109,08 | 854,33 | 632,95 | 494,08 |
| PHRR | kW/m ² | 290,17 (10,59) | 13,46 (9,10) | 27,34 (17,05) | 22,08 (8,96) | 27,76 (16,11) |
| MHRR | kW/m ² | 110,44 (16,49) | 8,01 (15,81) | 11,42 (1,79) | 14,89 (14,11) | 17,61 (16,86) |
| THR | MJ/m ² | 32,97 (14,91) | 5,05 (12,60) | 6,9 (2,51) | 9,05 (14,45) | 11,0 (12,86) |
| TML | % | 86,18 (4,03) | 8,82 (9,30) | 10,40 (5,75) | 15,69 (7,21) | 17,10 (1,51) |
| MLR | g/s | 0,084 (1,38) | 0,026 (4,14) | 0,026 (3,00) | 0,028 (7,18) | 0,034 (1,63) |
| EHC | MJ/kg | 11,76 (16,32) | 2,48 (13,43) | 3,69 (6,09) | 4,09 (10,47) | 4,56 (10,09) |
| TTI | s | 15 (7,87) | - | - | - | - |
| TIG | °C | 359 (1,95) | - | - | - | - |

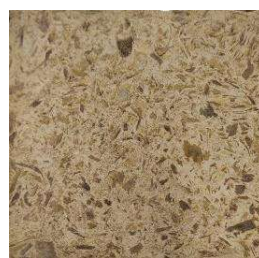
A Figura 4.23 apresenta o aspecto geral das amostras de serragem de madeira e bio-concretos, antes e após os ensaios do cone calorímetro. É possível observar a evolução da degradação e carbonização superficial do material com o aumento do teor de biomassa na mistura. Entre os bio-concretos há uma mudança na coloração do material, já para o caso da serragem, os resíduos no final da combustão consistiram em apenas cinzas de cor branca.



(a) Serragem



(b) BCM40



(c) BCM50



(d) BCM60



(e) BCM70

Figura 4.23- Imagens das amostras de serragem e bio-concretos antes e após os ensaios

4.5.1 Taxa de liberação de calor

A Figura 4.24 ilustra a curva típica de HRR medida em função do tempo decorrido no ensaio do cone calorímetro para a serragem de madeira.

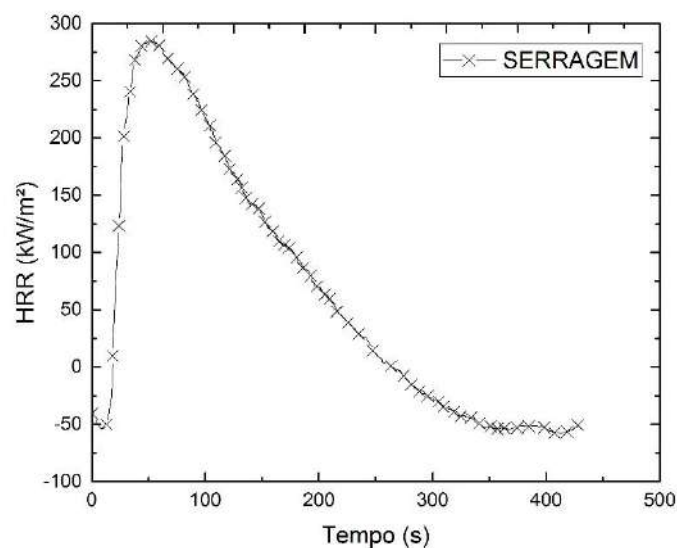


Figura 4.24- Curva típica de HRR da serragem de madeira

Analisando a Figura 4.24 é possível observar que após a ignição, por volta dos 15 segundos de ensaio, a taxa de liberação de calor cresce rapidamente até obter seu valor de pico (PHRR) onde a chama sustentada caracteriza um período de intensa combustão com grande liberação de calor e fumaça. Por fim, o valor de HRR diminui gradualmente à medida que a madeira ativa é esgotada.

Rocha (2014) apresentou o comportamento das curvas de HRR em função do tempo de doze tipos diferentes de madeira brasileira, além de dois subprodutos da madeira (MDF e OSB). Em seus resultados, que apresentam um perfil característico esperado de madeiras testadas no cone calorímetro, é possível observar além do primeiro pico que acontece imediatamente após a ignição, um segundo pico que acontece devido ao efeito de volta, onde a taxa de queima da amostra aumenta à medida que a onda térmica é refletida na parte de trás da amostra. Esse fenômeno acontece por se tratar de amostras de madeira maciça com camada de carbonização, que retarda este efeito, bem definida. No caso da serragem, há muitos vazios, e portanto oxigênio na amostra que funciona como combustível para uma queima mais rápida da biomassa.

Junhyun *et al.* (2011) estudaram o comportamento ao fogo de três tipos de pisos de madeira em duas condições: apenas a amostra de madeira (caso 1) e uma amostra que simula a real construção com uma camada de argamassa de cimento ligada por adesivo à madeira (caso 2). Ao avaliar as curvas HRR pelo tempo, foi possível observar que para o

caso 1 ocorreram dois picos devido ao efeito de volta provocado pela parte de trás da amostra, enquanto que no caso 2 ocorreu apenas o primeiro pico de ignição seguido de queda nos valores de HRR graças a camada de argamassa de cimento ligada à madeira. Tal diferença entre um teste em escala de laboratório e condição real de incêndio do material pode ajudar a obter uma compreensão mais precisa do comportamento ao fogo, que neste caso apresentou uma menor liberação de calor e, portanto, de energia.

O valor de PHRR é considerado o parâmetro que melhor expressa a intensidade máxima de uma curva de HRR (JUNHYUN *et al.*, 2011). Ele ocorre durante um período muito curto de tempo e geralmente lopo após a ignição e é um bom indicador da máxima flamabilidade do compósito (MOURITZ & GIBSON, 2007). O valor médio do PHRR da serragem mostrou-se superior (290 kW/m²), sendo de 95 a 222% maior que os valores encontrados por Rocha (2014). Junhyun *et al.* (2011) obtiveram elevados valores de PHRR (entre 205 e 329 kW/m²) ao estudar madeira compensada.

Por outro lado, todas as amostras de bio-concretos avaliadas não entraram em ignição e, portanto, não há a presença do pico característico. Entretanto, ao observar a Figura 4.25 é possível notar que o aumento da fração volumétrica de serragem nas misturas de bio-concreto movem a curva para cima, o que representa uma maior liberação de calor. A elevação no valor de HRR até aproximadamente 80 segundos de ensaio é justificada pela queima da serragem de madeira presente na superfície da amostra independente do teor de biomassa, até que se estabiliza e mantém um nível de HRR até o final do ensaio. Quanto maior a quantidade de biomassa, material combustível, maior a taxa de liberação de calor.

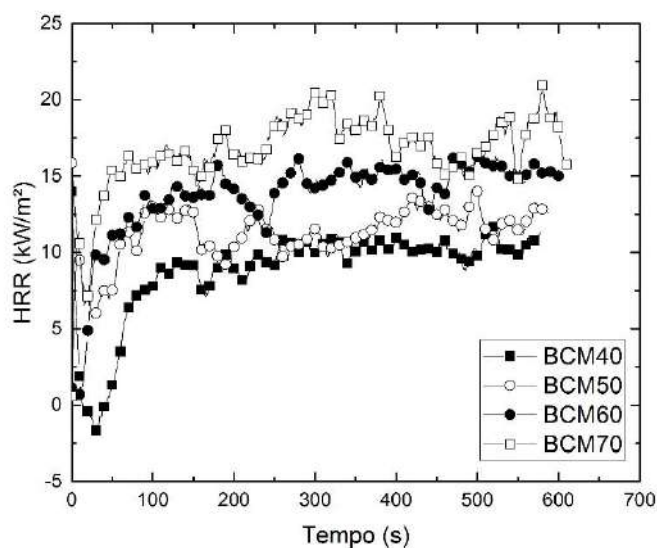


Figura 4.25- Curvas típicas de HRR dos bio-concretos

Há uma lacuna na literatura a respeito do estudo da reação ao fogo de bio-concretos de madeira e são poucos os trabalhos que discutem esta propriedade sobre concretos, uma vez que se trata de um material incombustível.

Puente *et al.* (2016) estudaram o comportamento ao fogo de pavimentos de concreto e asfalto através do cone calorímetro. Para as quatro misturas de concreto, com agregados graúdos e miúdos, sob fluxo de calor de 75 kW/m², durante 30 minutos de ensaio, todas as amostras não apresentaram ignição, mostrando que a contribuição deste material para um incêndio é nula. Correia *et al.* (2012) investigaram as propriedades de reação ao fogo de concretos produzidos com agregados reciclados de borracha em porcentagens de substituição de 5, 10 e 15%, sob fluxos de 25, 50 e 75 kW/m². Todas as amostras apresentaram um PHRR referente à ignição e combustão de voláteis da decomposição da borracha e redução do valor de HRR com o tempo devido à redução dos materiais combustíveis. Os valores de PHRR variaram de 13,1 kW/m², para a menor quantidade de borracha e menor e fluxo, a 122,4 kW/m² para a maior quantidade de borracha e maior fluxo de calor.

A Figura 4.26 mostra os resultados de MHRR e THR em função do teor de biomassa dos bio-concretos.

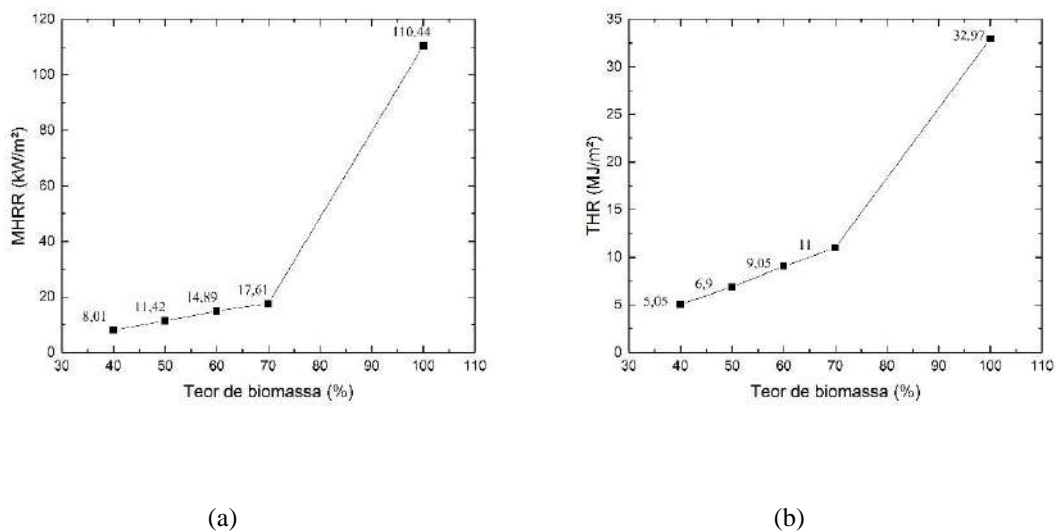


Figura 4.26- Curvas (a) MHRR e (b) THR em função do teor de biomassa

A tendência geral, observada na Figura 4.26 é que o MHRR e o THR aumente à medida que a densidade da amostra de bio-concreto de madeira diminui. Nota-se também uma grande discrepância nos valores quando compara-se os obtidos para os bio-concretos com os da serragem, mostrando que a pasta cimentícia que envolve a biomassa faz com que o material libere menos calor e energia, e quanto maior o volume de pasta, menor esta liberação de calor. Destaca-se que apenas 30% em volume de pasta cimentícia (BCM70) é capaz de reduzir em 84% a taxa média de liberação de calor e em 67% o total de energia liberado.

Kubler (1980) afirma que existe uma relação direta entre o teor de carbono na amostra e a quantidade de calor por ela produzida. Nesse sentido, os resultados dos testes corroboram com essa teoria, uma vez que mostram que quanto maior o teor de biomassa, e portanto o teor de carbono disponível para queima, maior o valor de THR.

A Figura 4.27 apresenta a evolução da temperatura superficial das amostras com o tempo de ensaio. Pode-se observar que até aproximadamente 80 segundos de ensaio há uma elevação de temperatura até que a mesma mantém um certo equilíbrio até o final do ensaio. Esta elevação inicial da temperatura pode ser justificada pela queima da serragem presente na superfície das amostras, o que aumenta a liberação de calor. O BCM40 e BCM50 apresentam uma variação de temperatura entre 350 e 430 °C, após o primeiro minuto de ensaio, com oscilações em seus valores até o final do ensaio. Já para o BCM60 e o BCM70 após o primeiro minuto de ensaio, as temperaturas já são superiores à 400 °C

e variam até 440 °C, com maior estabilidade dos valores quando comparados ao BCM40 e BCM50.

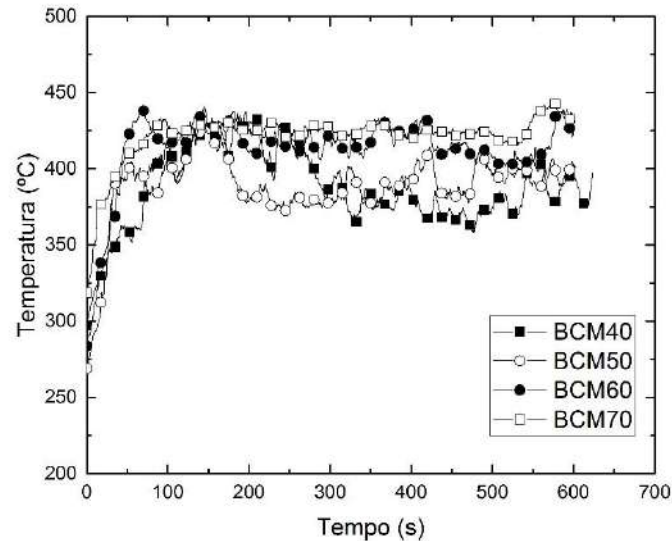


Figura 4.27- Evolução da temperatura durante o ensaio

4.5.2 Calor efetivo de combustão

O calor efetivo de combustão médio foi determinado a partir da relação entre o calor total liberado e a perda de massa total durante todo o ensaio. É importante ressaltar que, para os bio-concretos, os testes foram encerrados após 10 minutos de duração, como recomenda a ISO 13927 (2015), já que não apresentaram ignição.

A Figura 4.28 apresenta tendência de crescimento do valores de EHC com o aumento do teor de biomassa.

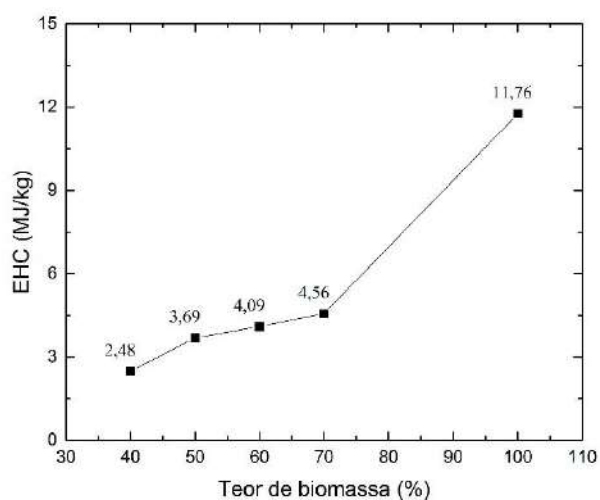


Figura 4.28- Curva EHC em função do teor de biomassa

Xu *et al.* (2015) reportaram valores de EHC entre 9 e 11 MJ/kg para quatro espécies diferentes de madeira, utilizando o fluxo de calor do cone calorímetro de 50 kW/m². Rocha (2014) encontrou valores entre 4,7 e 13,3 MJ/kg, uma vez que estudou doze espécies além de dois subprodutos da madeira. O valor encontrado nesse trabalho para a serragem de madeira (11,76 MJ/kg) encontra-se dentro dos limites reportados na literatura. Uma vez observada uma diminuição nos valores de THR com a redução de biomassa nas misturas, e sendo o EHC uma função do THR, a mesma tendência é observada para os bio-concretos. Tal redução de EHC é de 61,2; 65,2; 68,6 e 78,9% comparando-se a serragem (100% de biomassa) com os BCM70, BCM60, BCM50 e BCM40 respectivamente.

4.5.3 Perda de massa

A massa total perdida (TML) corresponde a variação entre a massa inicial e final da amostra. É clara a tendência de aumento de perda de massa com o aumento do teor de biomassa dos bio-concretos, uma vez que a madeira degrada-se mais rapidamente e a temperaturas mais baixas que a pasta cimentícia. Entretanto, vale ressaltar que no BCM70, apenas 30% de pasta cimentícia é capaz de envolver a serragem e protege-la da alta temperatura irradiada pelo cone calorímetro e preservar a massa da amostra do bio-concreto em 80%, quando comparado a perda obtida pela serragem (Figura 4.29 a). A taxa de perda de massa (MLR) também cresce com o aumento de biomassa entre as

misturas de bio-concreto e de forma mais acentuada para a serragem de madeira (Figura 4.29 b).

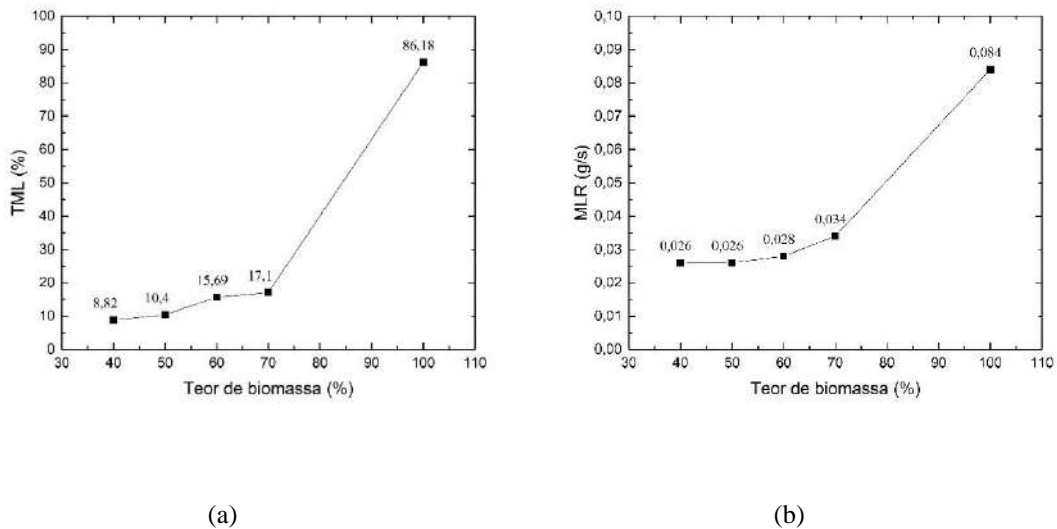


Figura 4.29-Curvas (a) TML e (b) MLR em função do teor de biomassa

Rocha (2014) determinou valores de TML quase constantes e iguais a 70% para as espécies de madeira estudadas. Analisando a reação ao fogo do bambu Mossô, Gomes (2019) encontrou valor médio de TML de 85%. Portanto, materiais lignocelulósicos mostram-se bastante vulneráveis a perda de massa em situação de incêndio. A produção de materiais unindo biomassas vegetais à materiais inorgânicos como cimento e pozolanas mostra-se como solução para mitigar ou reduzir este problema.

Na Figura 4.30 observa-se o avanço da queima nos bio-concreto a partir de imagens dos perfis das amostras, tiradas de um mesmo ângulo. É nítido o crescimento do dano causado com o aumento do teor de biomassa das misturas. Para o BCM70 uma espessa camada carbonizada com presença de cinzas na parte superior é observada (Figura 4.30 d). Essa camada carbonizada sobre o material na queima pode funcionar como um isolamento térmico e gradualmente reduzir a taxa de propagação de carbonização assim como da taxa de liberação de calor. Após o término do ensaio, mais da metade da espessura das amostras parecem visualmente inatingidas e a parte inferior da amostra intacta.



(a) BCM40



(b) BCM50



(c) BCM60



(d) BCM70

Figura 4.30- Camada de carbonização dos bio-concretos

Através de uma análise de imagens feita pelo programa *ImageJ* foi possível estimar uma espessura de carbonização das amostras. Foi realizada uma média entre 3 pontos (as duas extremidades e o centro). A Tabela 4.12 apresenta os valores médios de espessura atingida pela carbonização. O aumento no teor de biomassa implica numa maior profundidade de material carbonizado.

Tabela 4.12- Espessura média de carbonização dos bio-concretos com coeficientes de variação (% entre parênteses)

| Bio-concretos | Espessura de carbonização (mm) |
|----------------------|---------------------------------------|
| BCM40 | 7,81 (10,61) |
| BCM50 | 8,49 (8,08) |
| BCM60 | 8,73 (10,14) |
| BCM70 | 11,34 (12,69) |

4.5.4 Tempo e temperatura de ignição

Esta seção é destinada apenas a avaliação da serragem de madeira, uma vez que os bio-concretos não apresentaram ignição. A serragem de madeira apresentou ignição em média em 15 segundos e a uma temperatura de 359 °C. O valor de temperatura de ignição encontrado é semelhante aos obtidos para diferentes espécies de madeira por Rocha (2014). Xu *et al.* (2015) encontraram temperaturas superiores as encontradas nesse trabalho variando de 456 à 643°C, para duas madeiras dicotiledôneas de espécies diferentes.

Junhyun *et al.* (2011) apresentaram altos valores TTI, variando de 40 a 90 segundos para as amostras ensaiadas de madeira. Rocha (2014) obteve uma variação ainda maior, de 16 a 389 segundos. Xu *et al.* (2015) determinaram variações de 13 a 148 segundos. Esses pesquisadores mostram o que o tempo de ignição da madeira pode ser muito variável, dependendo da sua espécie, classe, densidade, teor de umidade, entre outros fatores. O tempo reduzido de ignição obtido neste trabalho pode se justificar pelo fato da biomassa ser uma mistura de quatro espécies diferentes de madeira e encontrar-se em forma de serragem, o que permite uma oxigenação na amostra que funciona como combustível e acelera o processo, além de não ter uma camada carbonizada que funcione como isolante térmico da própria amostra.

5 Considerações finais

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível concluir que:

- O tratamento alcalino com duas imersões em solução de Ca(OH)_2 foi o mais eficiente, pois os bio-concretos produzidos apresentaram resistência à compressão superior aos demais métodos de tratamento estudados;
- A condutividade térmica foi reduzida com o aumento do teor de biomassa. O BCM60 apresentou valor de condutividade aproximadamente 40% inferior ao do BCM40;
- O aumento da temperatura provoca uma diminuição na massa específica aparente dos bio-concretos. Para os BCM40 e BCM50, a partir de 200 °C a redução é pouco significativa, enquanto que para o BCM60 há um decréscimo de aproximadamente 30% de 200 à 250 °C;
- O aumento das frações volumétricas de biomassa nas misturas reduziu a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos bio-concretos;
- A evolução da temperatura provoca uma redução na resistência à compressão dos bio-concretos de forma mais branda até os 200 °C e mais acentuadamente para os 250 °C, enquanto que o módulo de elasticidade apresenta elevada redução a partir dos 100 °C. Na avaliação de tenacidade do material, o comportamento pós-fissuração do bio-concreto com alta capacidade de deformação independe da temperatura;
- A combinação da serragem de madeira, que é um material combustível e entra em ignição rapidamente sob fluxo de calor de 50 kW/m², com pasta cimentícia, mesmo que em apenas 30% em volume, forma um material que não apresenta ignição;
- A liberação de calor, o calor efetivo de combustão e a perda de massa aumentam com a elevação do teor de biomassa nas misturas;
- Finalmente, pode-se considerar viável a utilização do bio-concreto de madeira como material de construção em diferentes aplicações como revestimentos e núcleos de painéis, já que este não teve sua resistência muito afetada pela elevação da temperatura (até o teor de 50%) e que, pelo menos até o teor de 70% de

biomassa, o bio-concreto não apresentou ignição, sendo portanto um material que não contribui para um incêndio.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento desta pesquisa surgiram algumas proposições para realização em trabalhos futuros:

- Realizar o ensaio de microscopia óptica para as amostras de bio-concreto, para melhor compreender o comportamento deste material, sob diferentes temperaturas, em escala microestrutural.
- Obter resultados de produção de fumaça e monóxido de carbono para amostras de bio-concreto e avaliar a influência do teor de biomassa nessas características.
- Produzir bio-concretos com teores de biomassa mais elevados afim de determinar qual o teor torna o material combustível.

Referências Bibliográficas

AL ROUSAN, Taleb Mustafa. *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. 2005. Tese de Doutorado. Texas A&M University.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1018. *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Load)*. [S.l.], 1997.

AMZIANE, Sofiane; SONEBI, Mohammed. Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, v. 1, p. 31-38, 2016.

AMZIANE, Sofiane; COLLET, Florence (Ed.). *Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM*. Springer, 2017.

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.

ANDREOLA, V. M. et al. Partial replacement of cement by combination of fly ash and metakaolin in bamboo bio-concretes. *3rd International Conference on Bio-Based Building Materials*. Anais Beslfast, United Kingdom, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: *Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: *Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro, 2016.

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

AZEVEDO, A. F. F. L. C. *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*. PhD thesis, Universidade do Minho, Minho, 2002.

BABRAUSKAS, Vytenis; PEACOCK, Richard D. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard. *Fire safety journal*, v. 18, n. 3, p. 255-272, 1992.

BABRAUSKAS, Vytenis. Engineering variables to replace the concept of 'noncombustibility'. *Fire technology*, v. 53, n. 1, p. 353-373, 2017.

BADUGE, Shanaka Kristombu et al. Performance of lightweight hemp concrete with alkali-activated cenosphere binders exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, v. 224, p. 158-172, 2019.

BEDERINA, M. et al. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 3, p. 662-668, 2007.

BELAYACHI, Naima; HOXHA, Dashnor; ISMAIL, Brahim. Impact of fiber treatment on the fire reaction and thermal degradation of building insulation straw composite. *Energy Procedia*, v. 139, p. 544-549, 2017.

BERALDO, A. L. et al. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*, v. 8, 2002.

BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. *Mechanics of wood and wood composites*. 2nd. Malabar: Krieger Publishing Company, p. 712, 1993.

CALDAS, L. et al. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. In: *2nd International Conference on Bio-Based Building Materials & 1st Conference on Ecological Valorisation of Granular and Fibrous Materials*. 2017.

CALDAS, L. R., 2020, *Ferramenta de análise dinâmica para avaliação da emissão de carbono em edificações pelo uso de biomateriais*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

CASTRO, Vinicius et al. Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. *Revista Árvore*, v. 38, n. 5, p. 935-942, 2014.

CORREIA, J. R. et al. Fire reaction properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire and materials*, v. 36, n. 2, p. 139-152, 2012.

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 BERTOLINI, Marília et al. Wood-Cement Composites from Wastes of *Pinus* Sp. Wood: Effect of Particles Treatment. *International Journal of Composite Materials*, 4(2), p. 146-149, 2014.

DA SILVA, J. B., 2017, *Comportamento sob altas temperaturas de concretos com agregados reciclados de concreto*. 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*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DA SILVA, N. A., 2019, *Estudo da aderência bambu-bioconcreto*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

DIETENBERGER, M. A.; HASBURGH, L. E. 2016. Wood Products: Thermal Degradation and Fire. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 8 pp.

DINH, T. M. *Contribution to the development of precast hempcrete using innovative pozzolanic binder*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2014.

DIQUÉLOU, Youen et al. 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 and Concrete Composites*, v. 55, p. 112-121, 2015.

DRYSDALE, Dougal. *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons, 2011.

FAN, Mizi et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 135-140, 2012.

FERREIRA, Saulo Rocha. *Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2012.

FIDELIS, M.E.A., 2014, *Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis Reforçados com Fibras de Juta*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

FIGUEROA, Manuel Jesús Manriquez; DE MORAES, Poliana Dias. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente construído*, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FINGERLOOS, Frank. Buchbesprechung: fib Bulletin 38: Fire design of concrete structures—materials, structures and modelling. *Beton-und Stahlbetonbau*, v. 102, n. 9, p. 662-662, 2007.

FRIQUIN, Kathinka Leikanger. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and materials*, v. 35, n. 5, p. 303-327, 2011.

GOMES, B. M C., 2019, *Caracterização mecânica, estabilidade térmica e reação ao fogo do bambu mossô (L. Phyllostachys Pubescens)*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

GOSSELINK, R. J. A. et al. Wood preservation by low-temperature carbonisation. *Industrial Crops and Products*, v. 19, n. 1, p. 3-12, 2004.

GOVIN, Alexandre. *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment – Modification de l'hydratation du ciment par le bois*. 2004. These (Docteur en Génie des Procédés), Université Jean Monnet de Saint Etienne, Saint Etienne.

- GRUBEŠA, Ivanka Netinger et al. Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete. *Construction and building materials*, v. 184, p. 473-484, 2018.
- HAGER, Izabela. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, v. 61, n. 1, p. 145-154, 2013.
- HAKKARAINEN, T.; HAYASHI, Y. Comparison of Japanese and European fire classification systems for surface linings. *Fire Science and Technology*, v. 21, n.1, p. 19-42, 2001.
- HAURIE, Laia et al. Influence of different parameters in the fire behaviour of seven hardwood species. *Fire Safety Journal*, 2018.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13927: *Plastics – Simple heat release test using a conical radiant heater and a thermopile detector*, 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17554: *Reaction to fire tests – Mass loss measurement*, 2014.
- IWAKIRI, Setsuo et al. Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 14, n. 3, p. 217-223, 2015.
- JOHN, Maya Jacob; THOMAS, Sabu. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.
- KHOURY, Gabriel Alexander. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.
- KIM, Hee-Soo et al. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochimica Acta*, v. 451, n. 1-2, p. 181-188, 2006.
- KIM, Junhyun; LEE, Jeong-Hun; KIM, Sumin. Estimating the fire behavior of wood flooring using a cone calorimeter. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, v. 110, n. 2, p. 677-683, 2012.

- KIM, Kook-Han et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and concrete research*, v. 33, n. 3, p. 363-371, 2003.
- KLOCK, U., ANDRADE, A. S. de. *Química da madeira*. Universidade Federal do Paraná. 4 ed. Curitiba, 2013.
- KUBLER H. Wood as building and hobby material. *John Wiley & Sons, Inc.*, USA, 1980.
- KRÜGER, E. L., ADRIAZOLA, M. K., MATOSKI, A., IWAKIRI, S. Thermal analysis of wood-cement panels: heat flux and indoor temperature measurements in test cells. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 6, p. 2299-2305, 2009.
- LANOS, Christophe. Bio-aggregate Based Building Materials Exposed to Fire. In: *Bio-aggregates Based Building Materials*. Springer, Dordrecht, 2017. p. 149-165.
- 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, R. C. A., KIRCHHOF, L. D., SILVA FILHO, L. C. P. Variação de propriedades mecânicas de concretos convencionais e de alta resistência em temperaturas elevadas. *Concreto & Construção*, v. 46, p. 65-68, 2007.
- MARQUES, A. M.; CORREIA, J. R.; DE BRITO, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal*, v. 58, p. 49-57, 2013.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: *IBRACON*, 2ed, 2014, 782 p.
- MENDES, Lourival Marin Mendes et al. Potencial de utilização da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* na produção de painéis cimento-madeira. *Cerne*, v. 17, n. 1, p. 69-75, 2015.
- MINDEGUIA, Jean-Christophe et al. On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 16, n. 2, p. 236-253, 2012.

MOURITZ, Adrian P.; GIBSON, Arthur Geoff. Fire properties of polymer composite materials. *Springer Science & Business Media*, 2007.

NASCIMENTO, M. A. F. R., 2018, *Aprimoramento das propriedades de retardamento ao fogo de polímeros reforçados com fibra de vidro*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

PARCHEN, C. F. A., 2013, *Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná.

PINTO, M. C., 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*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

POLETO, Matheus et al. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, v. 109, p. 148-153, 2012.

PONCSÁK, Sándor et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology*, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.

PUENTE, E.; LÁZARO, D.; ALVEAR, D. Study of tunnel pavements behaviour in fire by using coupled cone calorimeter–FTIR analysis. *Fire safety journal*, v. 81, p. 1-7, 2016.

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

RAMAGE, Michael H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 333-359, 2017.

ROCHA, M. A. F., 2014, *Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

SANDERMANN, W., BRENDEL, M. The ‘cement poisoning’ effect of wood content materials and their dependence on the chemical constitution. *Holz Roh Werkst*, v. 14(8), p. 307-313, 1956.

SANTOS, D. O. J., 2020, *Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com face em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

SHEBANI, A. N., VAN REENEN, A. J., MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood-LLDPE composites. *Thermochimica Acta*, v. 481, n. 1-2, p. 52-56, 2009.

SIMATUPANG, M. H.; SCHWARZ, G. H.; BROKER, F. W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: 8. *World Forestry Congress, Jakarta (Indonesia), 16-28 Oct 1978*, 1978.

SIQUEIRA, I. S., 2019, *Influência de micro e nano reforço celulósico na hidratação e resistência mecânica de pastas de cimentação leves e de densidade normal*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

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.

STANLEY, R. G. Extractives of wood, bark, and needles of the southern pines--a review. *Forest Prod J*, 1969.

STOLLARD, Paul; ABRAHAMS, John. *Fire from first principles: a design guide to building fire safety*. Taylor & Francis, 1999.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TCHÉHOUALI, D. A, et al., 2013, The most suitable species of six west African hardwood species for wood-cement composites. *Research Journal of Recent Sciences*, v. 2277, p 2502, 2013.

THOMAS, Peter. *Trees: their natural history*. Cambridge University Press, 2014.

- VALVERDE, Sebastião Renato et al. Mercado da madeira de reflorestamento. *Revista da Madeira*, p. 87, 2005.
- WALKER, John CF. Primary wood processing: principles and practice. *Springer Science & Business Media*, 2006.
- WANG, Xiao Ping et al. Effect of Composition of Calcium Lignosulfonate on Setting of Portland Cement with Anhydrite. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, p. 877-882, 2012.
- WANG, Xin et al. Carbon-family materials for flame retardant polymeric materials. *Progress in Polymer Science*, v. 69, p. 22-46, 2017.
- WHITE, Robert H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and fiber science*, v. 19, n. 4, p. 446-452, 2007.
- WHITE, Robert H.; DIETENBERGER, Mark A. Fire safety of wood construction. *Interface*, v. 18, p. 3, 2010.
- WIEDENHOEFT, A. Structure and function of wood. *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*, 2010.
- WIEMANN, Michael C. et al. Characteristics and availability of commercially important woods. *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, p. 508, 2010.
- WILK, Małgorzata et al. Carbonisation of wood residue into charcoal during low temperature process. *Renewable Energy*, v. 85, p. 507-513, 2016.
- WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The Chemistry of Wood Strength. In: ROWELL, R. M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.
- WINANDY, J.E.; ROWELL, R.M., 2013. Chemistry of Wood Strength. In: Rowell, R.M. (Ed.), *Handbook of wood Chemistry and Wood Composites*, second ed. Boca Raton, FL: CRC Books. Chapter 11.
- XU, Qingfeng et al. Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 416-427, 2015.

YANG, Haiping et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

YANG, Haiping et al. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy & Fuels*, v. 20, n. 1, p. 388-393, 2006.

YAO, Fei et al. Thermal decomposition kinetics of natural fibers: activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. *Polymer Degradation and Stability*, v. 93, n. 1, p. 90-98, 2008.