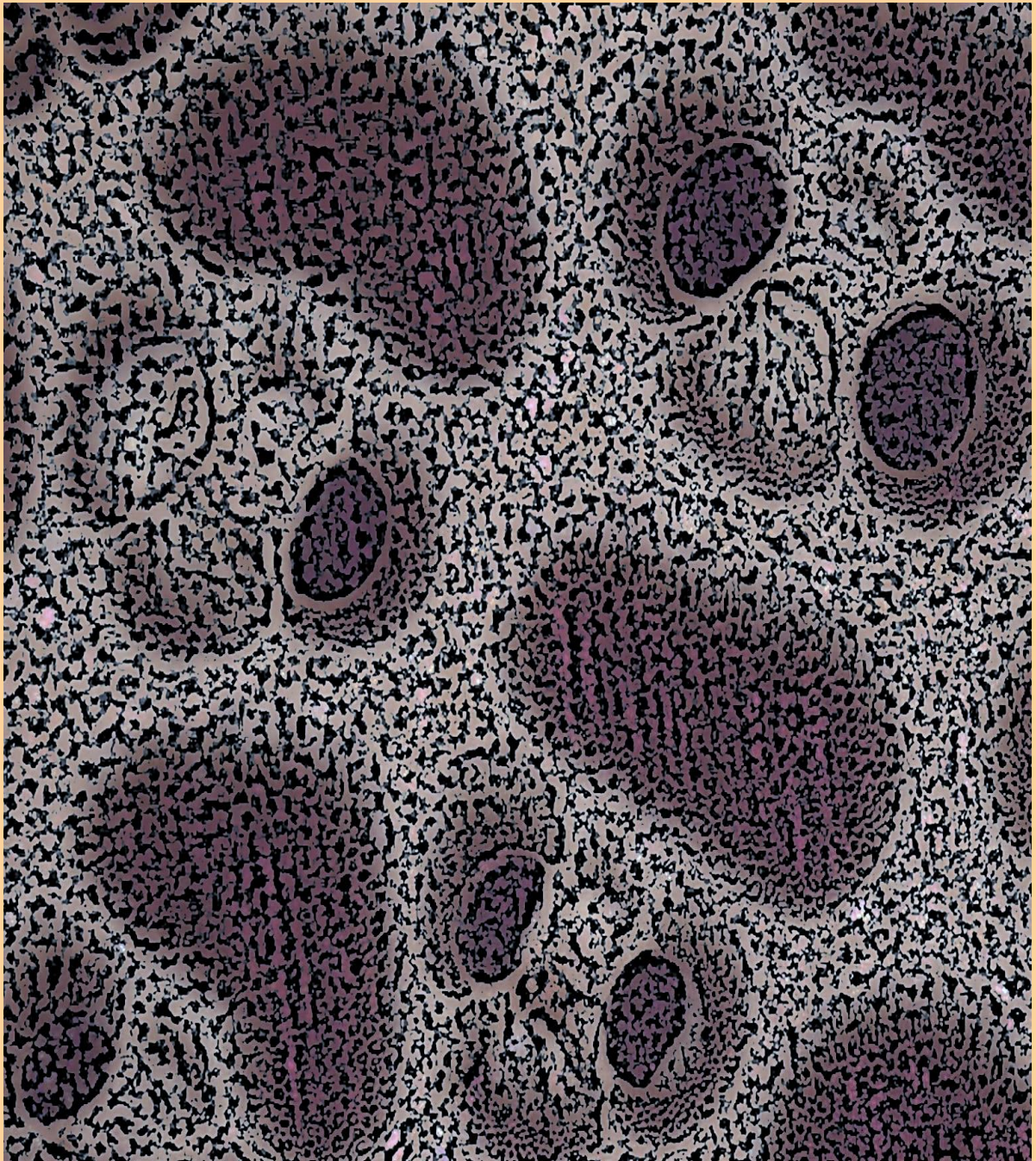

EFEITO DA IMPREGNAÇÃO COM POLÍMEROS SOBRE AS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO BAMBU *B. vulgaris*

Sandra Patricia Reyes Ortiz





Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais

EFEITO DA IMPREGNAÇÃO COM POLÍMEROS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU *B. vulgaris*

Por

Sandra Patricia Reyes Ortiz

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do título de Doutora em Ciência dos Materiais.*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2017

O77e Ortiz, Sandra Patrícia Reyes.
Efeito da impregnação com polímeros sobre as
propriedades mecânicas do *Bambu Bambusa Vulgaris* / Sandra
Patrícia Reyes Ortiz. - João Pessoa, 2017.
232 f.: il. -

Orientador: Normando Perazzo Barbosa.
Tese (Doutorado) - UFPB/ PPCEM

1. Engenharia de Materiais. 2. Bambu B. vulgaris.
3. Processos de Polimerização. I. Título.

UFPB/BC

CDU: 620.1(043)



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais

EFEITO DA IMPREGNAÇÃO COM POLÍMEROS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU *B. vulgaris*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência dos Materiais.

Sandra Patricia Reyes Ortiz

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

João Pessoa – Paraíba

Março de 2017

SANDRA PATRICIA REYES ORTIZ

EFEITO DA IMPREGNAÇÃO COM POLIMEROS SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU *BAMBUSA VULGARIS*

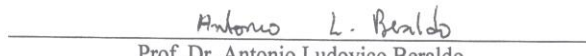
Aprovada em: 30/03/2017

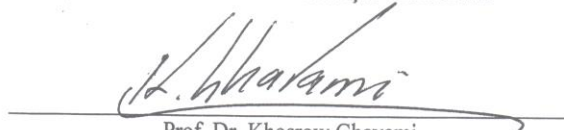
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa Orientador
Presidente-UFPB/PPCEM


Prof. Dr. Eliton Souto de Medeiros
Membro interno-UFPB/PPCEM


Prof. Dr. Marçal Rosas Florentino Lima Filho- UFPB
Membro interno-UFPB/PPCEM


Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo
Examinador externo à instituição- UNICAMP


Prof. Dr. Khosrow Ghavami
Examinador externo à instituição- PUC-RIO

Uma página não é suficiente para agradecer e registrar todo o amor que sinto pelas pessoas que me apoiaram na elaboração deste trabalho. Mas ressalto minha especial dedicatória aos meus filhos Jerfy e Nicolas, à minha mãe Herly Ortiz, e à minha querida irmã Cristina Reyes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela minha existência e por me permitir cumprir com esta grata experiência na vida.

A minha família na Colômbia, por todo seu apoio e amor, e por entender as razões que teve para me ausentar, por tanto tempo de casa. Agradeço especialmente aos meus filhos que adoro de coração por preencher cada momento de minha vida com o mais grande amor e satisfação. A minha mãe e a minha irmã as quais espero retribuir com os resultados obtidos, como eu sempre acostumei elas.

Ao meu namorado, Tony Máximo, e à sua família por ser a fonte de carinho de lar nesta maravilhosa cidade. Agradeço seu amor, sua colaboração e por me incentivar nos momentos em que a fraqueza me atingia.

Ao Professor Normando Perazzo Barbosa, para quem fico sem palavras que possam expressar o admirável ser humano que é. Obrigada pelas oportunidades, pelos conhecimentos, pelo carinho, pelo impulso e pela ajuda que me tem brindado desde que lhe conheci.

A todos que fazem parte do LABEME (Laboratório de Ensaio de Materiais e Estrutura) da UFPB, em especial aos técnicos, Ricardo, Sebastião, Delby, Otoniel, Zito, Beto,

Milson, e Cláudio e para Bete e Lila, pelo carinho. Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Materiais e Solidificação Rápida da UFPB, Meyson, André, Joelma, Breno, Isaque pela disposição e acompanhamento quando necessário. Aos técnicos, Elson, Dorivaldo e Romildo, pelos auxílios prestados e pela sua boa disposição.

Ao Instituto de ciência e tecnologia - COLCIENCIAS, na Colômbia, e ao CNPq e CAPES, no Brasil, pelo apoio econômico que me permitiu a dedicação exclusiva aos meus estudos, nos dois países envolvidos, terminando uma tese doutoral diferente em cada um deles.

Ao Professor Ulisses, por toda a orientação e apoio, e aos professores, Jackson, Romualdo, Sandro, Rodiney, Eliton e Aluisio, por toda ajuda prestada e pelos direcionamentos que me ajudaram a concluir com êxito este trabalho.

Aos colegas e amigos da turma do doutorado, Márcia, Leonardo, Zé Neto, Rogerson, Lucas, Roberta, Patrícia, Mavi, Bruno, e, em especial, ao aluno Zé Augusto Gomes, do mestrado em engenharia civil, que colaborou na parte final desta tese com seu trabalho e conhecimento.

A todos que não mencionei, mas para os quais, no momento exato dei um “obrigada” ou um “Deus lhe abençoe”. Para todos, para a banca avaliadora desta tese e para Deus.... Muito Obrigada!!

Cada instante é um momento de aprendizado que devermos aproveitar para fazer o melhor para nós e para quem nos acompanham nesta experiência chamada vida

RESUMO

Pesquisas que tratam do processo de impregnação com polímeros geralmente referem-se à madeira e só alguns poucos trabalhos tratam do bambu. Isto talvez porque, na região dos nós, a estrutura interna do bambu é de uma grande complexidade. Neste trabalho, busco-se apresentar o efeito da impregnação com polímeros sobre as propriedades físico-mecânicas do bambu *B. vulgaris*, praticamente a única espécie de bambu disponível no Estado da Paraíba. Inicialmente pretendia-se chegar à impregnação de colmos longos, mas logo se viu a dificuldade de passagem dos polímeros através dos nós. Desta forma, partiu-se para estudar a impregnação de pequenas amostras de bambu adaptando-se as normas ASTM 1413-99 e ASTM 143-09. Neste trabalho, foram pesquisados os processos de polimerização dos monômeros de estireno (St), de metacrilato de metila (MMA) e de acrilato de butila (BuA), nos respectivos homopolímeros, assim como no copolímero poli(St-co-MMA), designado como SM, e no terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA), denominado de SMB. Foram estudadas a cinética da reação, o grau de conversão e a viscosidade com o fim de conhecer o processo de polimerização antes de se realizar as impregnações nos tecidos internos do bambu. Os corpos de prova elaborados para os ensaios mecânicos mantiveram as proporções 1:1:4 e 1:1:15 em relação à espessura:largura:comprimento. As modificações do material lignocelulósico após a infiltração da solução de glutaraldeído a 2,5% (GA) e da impregnação

com as misturas poliméricas (SM e SMB) feitas a vácuo, foram avaliadas utilizando-se as técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios-X (DRX), análises térmicas (DSC e TGA) e espectroscopia no infravermelho (FTIR). Os resultados confirmaram a presença dos polímeros dentro dos tecidos do bambu, indicando o sucesso da metodologia aplicada. Para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova impregnados, foram sempre testados corpos de prova similares na condição natural (BN) e também corpos de prova que ficaram expostos à temperatura de 50°C (BT), considerados como referência. A avaliação das propriedades mecânicas foi realizada através do ensaio de compressão paralela às fibras, de compressão perpendicular às fibras e de flexão, junto com os respectivos módulos de elasticidade. Os corpos de prova impregnados com SM e SMB preinfiltrados com a solução GA apresentaram melhor desempenho de aqueles na condição natural, exibindo diminuição na absorção de água, nas variações dimensionais e incrementando as resistências mecânicas e módulos de elasticidade, além de se mostrarem visualmente imunes ao ataque de insetos.

PALAVRAS-CHAVE: estireno, metacrilato de metila, acrilato de butila, compressão paralela às fibras, compressão perpendicular às fibras, flexão, absorção de água, variação dimensional, durabilidade.

ABSTRACT

Researches that addresses the process of impregnation with polymers generally refers to wood and only a few works deal with bamboo. Perhaps this is because, in the knot region, the internal structure of bamboo is very complex. The aim of this work was to present the effect of polymer impregnation on the physical-mechanical properties of *B. vulgaris* bamboo, practically the only bamboo species available in the State of Paraíba. Initially it was intended to reach the impregnation of long stems, but soon it was seen the difficulty of passing the polymers through the knots. In this way, the study of the impregnation of small samples of bamboo was initiated adapting to the norms ASTM 1413-99 and ASTM 143-09. In this work, the polymerization processes of the styrene (St), methyl methacrylate (MMA) and butyl acrylate (BuA) monomers were investigated in the respective homopolymers, as well as in the poly (St-co-MMA) copolymer, designated as SM, and poly (St-co-MMA-co-BuA) terpolymer, designed SMB. The kinetics of the reaction, the degree of conversion and the viscosity were studied in order to know the polymerization process before impregnations were carried out in the inner tissues of the bamboo. The specimens prepared for the mechanical tests maintained the proportions 1: 1: 4 and 1: 1: 15 in relation to the thickness: width: length. Modifications of the lignocellulosic material after infiltration of 2.5% glutaraldehyde solution (GA) and impregnation with the vacuum blends (SM and SMB) were evaluated using optical microscopy (OM) and Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffractometry (XRD), thermal analysis (DSC and TGA) and infrared spectroscopy (FTIR).

Results have confirmed the presence of polymers within the bamboo tissues, indicating the applied methodology success. In order to evaluate the physical and mechanical properties of the impregnated test specimens, similar test specimens were always tested in the natural condition (BN) and also test specimens that were exposed to the temperature of 50°C (BT), considered as a reference. The evaluation of the mechanical properties was carried out by means of compression test parallel of the fibers, compression test perpendicular to the fibers and the bending test, together with the respective modulus of elasticity. The samples impregnated with SM and SMB pre-infiltrated with the GA solution presented better performance than those in the natural condition, exhibiting a decrease in water absorption, dimensional variations and increasing mechanical strength and modulus of elasticity, as well as showing Visually immune to insect attack.

Key Words: Styrene, methyl methacrylate, butyl acrylate, parallel fiber compression, fiber perpendicular compression, flexure, water absorption, dimensional variation, durability.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	4
1.2. Objetivos	6
1.3. Hipótese	6
2. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS	7
2.1. Processo de polimerização	7
2.1.1. Copolimerização	9
2.1.2. Caracterização dos copolímeros	10
2.1.3. Análise térmica	10
2.1.4. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	11
2.1.5. Propriedades mecânicas	13
2.2. Metodologia	14
2.2.1. Copolimerização do poli(St-co-MMA) e do terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA)	14
2.2.2. Dilatometria	14
2.2.3. Viscosimetria	16
2.2.4. Microscopia eletrônica de varredura (SEM) –Adaptado de Gebizlioghu et al. (1990)	17
2.2.5. Calorimetria diferencial exploratoria (DSC)- Adaptado de Bing Meng et al. (2012)	18
2.2.6. Análise termogravimétrica (TGA) -Adaptado de Leskovac et al. (1999)	18
2.2.7. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier- adaptado de Cerrada M.L. et al. (2001)	18
2.2.8. Ensaio de compressão- Adaptado de Manrich Silvio (2005), de acordo com a norma ASTM D-695	19
2.3. Resultados e Discussão	20
2.3.1. Processo de polimerização	20
2.3.1.1. Dilatometria	20
2.3.1.2. Grau de avanço da reação e o efeito gel Trommsdorff - Norrish	26
2.3.1.3. Viscosimetria	28
2.3.2. Caracterização dos polímeros	30
2.3.2.1. Microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (SEM)	31
2.3.2.2. Calorimetria de varredura diferencial (DSC)	34
2.3.2.3. Análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTGA)	35
2.3.2.4. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	36
2.3.2.5. Ensaio de compressão dos corpos de prova dos polímeros	40
3. BAMBU <i>B. vulgaris</i> IMPREGNADO COM POLÍMEROS	42
3.1. Generalidades sobre o bambu	42
3.1.1. Processos de preservação do colmo de bambu	48
3.1.2. Composição química do bambu	50
3.1.3. Reatividade e fixação de material lignocelulósico	52

3.1.4. <i>Identificação de compostos lignocelulósicos</i>	55
3.1.5. <i>Processo de impregnação com polímeros</i>	56
3.2. Metodologia	59
3.2.1. <i>Extração de corpos de prova do bambu</i>	59
3.2.2. <i>Infiltração com soluções fixadoras de tecido—Adaptação da Norma ASTM D 1413-99</i>	61
3.2.3. <i>Impregnação com monômeros e polimerização in situ</i>	63
3.2.4. <i>Ensaio mecânicos- Adaptação da norma ASTM 143-09</i>	64
3.2.5. <i>Microscopia óptica – Adaptado de Liese (1994)</i>	66
3.2.6. <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV) –adaptado de Gebizlioghu et al. (1990)</i>	66
3.2.7. <i>Espectroscopia no Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) - adaptado de Cerrada et al. (2001)</i>	67
3.2.8. <i>Difração de Raios-X. (DRX) – Adaptado de Liu et al. (2012)</i>	68
3.2.9. <i>Calorimetria de varredura diferencial (DSC)- Adaptado de Bing Meng et al. (2012)</i>	68
3.2.10. <i>Análise termogravimétrica (TGA) -Adaptado de Leskovac et al. (1999)</i>	68
3.2.11. <i>Percentagem de absorção de água</i>	68
3.3. Resultados e Discussão	69
3.3.1. <i>Avaliação de um sistema inicial de infiltração</i>	69
3.3.1.1. <i>Infiltração das soluções fixadoras de tecido FAA e GA nos corpos de prova de B. vulgaris</i>	75
3.3.1.2. <i>Variação dos tamanhos dos vasos de metaxilema em relação ao tratamento de infiltração com substâncias fixadoras de tecidos</i>	80
3.3.2. <i>Polimerização in situ em corpos de prova de bambu B. vulgaris</i>	86
3.3.3. Propriedades Mecânicas	91
3.3.3.1. <i>Ensaio de compressão paralela às fibras (Cp)</i>	92
3.3.3.2. <i>Ensaio de compressão perpendicular às fibras (Cr)</i>	101
3.3.3.3. <i>Ensaio de resistência à flexão (F)</i>	108
3.3.4. Caracterização do material composto de bambu-polímero	116
3.3.4.1. <i>Análise por microscopia óptica de alta resolução (OM) e microscopia eletrônica de varredura (SEM)</i>	116
3.3.4.2. <i>Análise por difração de raios-X (DRX)</i>	119
3.3.4.3. <i>Análise calorimétrica das amostras de Bambu B. vulgaris</i>	122
3.3.4.3.1. <i>Análise por calorimetria de varredura diferencial (DSC)</i>	122
3.3.4.3.2. <i>Análise termogravimétrica (TGA)</i>	125
3.3.4.4. <i>Análise por espectrofotometria infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)</i>	127
3.3.5. <i>Absorção de água e variação dimensional</i>	129
3.3.6. <i>Resistência à degradação</i>	133
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
ANEXOS	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Reação de polimerização entre monômeros de estireno e de metacrilato de metila.	9
Figura 2-2. Espectros no Infravermelho do A.) Poliestireno e B.) Polimetacrilato de metila	12
Figura 2-3. Espectro no Infravermelho do poliacrilato de butila	12
Figura 2-4. Tensão- Deformação no ensaio de tração (A), e no ensaio à compressão (B).	13
Figura 2-5. Sistema de dilatometria	15
Figura 2-6. Reômetro de cone e placa AR 2000.	16
Figura 2-7. Polímero precipitado com metanol (A), e determinação de sólidos para diferentes tempos de polimerização do sistema poli(St-co-MMA-co-BuA) (B).	17
Figura 2-8. Corpos de prova dos copolímeros para ensaios a compressão.	19
Figura 2-9. Método Kezdy-Swimbourne para calcular $h\infty$, aplicado à polimerização do poliestireno.	22
Figura 2-10. Método de Kesdy-Swimbourne para determinar a Kap na polimerização do poliestireno.	22
Figura 2-11. Efeito gel observado nas amostras durante a polimerização do poliestireno.	27
Figura 2-12. Porcentagens de conversão obtidas para diferentes sistemas em polimerização a 60°C e com $[I]_0=0.037$ M.	28
Figura 2-13. Gráfico experimental PMMA com $[PBO]=0,037M$ (A)*, e Gráfico simulado para o sistema PMMA com $[PBO]=0,0155M$ a 50°C (B)**.	29
Figura 2-14. Microfotografias do copolímero SM e terpolímero SMB com aumento de 20X.	31
Figura 2-15. Microfotografias obtidas por SEM sobre os polímeros e copolímeros.	32
Figura 2-16. Termogramas obtidos por DSC sobre os polímeros e copolímeros.	34
Figura 2-17. Termograma obtido por TGA a partir das amostras dos polímeros.	35
Figura 2-18. Derivada dos termogramas obtidos por TGA sobre as amostras poliméricas.	36
Figura 2-19. Espectro no infravermelho do poliacrilato de butila (PBuA)	37
Figura 2-20. Espectro no infravermelho do polimetacrilato de metila (PMMA)	37
Figura 2-21. Espectro no infravermelho do poliestireno (PSt)	38
Figura 2-22. Espectro no infravermelho do copolímero poli(St-co-MMA)	39
Figura 2-23. Espectro no infravermelho do terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA)	39
Figura 2-24. Tensão- Deformação das amostras poliméricas durante o ensaio de compressão.	40
Figura 2-25. Corpos de prova de copolímeros após o ensaio de compressão axial.	41
Figura 3-1: Partes de um colmo de bambu	42
Figura 3-2: Estrutura geral de um colmo de bambu (A). Desenho de elementos dos feixes vasculares no nó (B).	43
Figura 3-3: Microfotografias da anatomia do bambu <i>B. vulgaris</i> . Corte longitudinal (A). Corte transversal (B, C).	44
Figura 3-4: Fotografia da face transversal de um espécimen prismático de bambu <i>B.</i>	44

vulgaris.

Figura 3-5: Estrutura da parede da fibra natural do Bambu (A). Detalhes sobre a estrutura da fibra de bambu (B)*.	46
Figura 3-6: Tiloses bloqueando os vasos condutores.	47
Figura 3-7: Ataque de insetos sobre um nó de <i>B. vulgaris</i> (A). Deterioro causado pelo ataque de insetos em uma construção (B).	48
Figura 3-8: Representação das microfibrillas de celulosa na parede celular.	51
Figura 3-9: Estruturas químicas de hemicelulose (A). Lignina (B).	52
Figura 3-10. Seccionamento das peças para a elaboração do corpo de prova.	59
Figura 3-11. Elaboração dos espécimens de bambu <i>B. vulgaris</i> Corte de entrenós (A), lixado dos corpos de prova (B), rotulagem das amostras (C) e armazenamento (D).	60
Figura 3-12. Sistema de infiltração e impregnação	62
Figura 3-13. Preparação das amostras para o processo de secagem	62
Figura 3-14. Ensaio de compressão paralela às fibras (A), ensaio de compressão perpendicular às fibras (B).	65
Figura 3-15. Ensaio de resistência à flexão.	65
Figura 3-16. Corte das amostras usando minitono Struers	67
Figura 3-17. Processo de moagem das amostras	67
Figura 3-18: Processo de deslocamento de substâncias ao longo do colmo do bambu.	70
Figura 3-19: Fotografias do deslocamento do líquido sob pressão através dos colmos	71
Figura 3-20. Diagramas de caixa da distribuição da massa das amostras tratadas com solução FAA e solução de glutaraldeído (GA)	76
Figura 3-21: Variação dimensional pós-tratamento	76
Figura 3-22. Diagramas de caixa da distribuição do volume das amostras tratadas com solução FAA e solução de glutaraldeído (GA)	77
Figura 3-23. Diagramas de caixa da distribuição da densidade das amostras tratadas com solução FAA e solução de glutaraldeído (GA)	78
Figura 3-24: Microfotografias de bambu <i>B. vulgaris</i> antes e depois dos tratamentos de infiltração com solução FAA (A) e com solução de glutaraldeído 2.5% (B)	81
Figura 3-25: Microfotografias antes (A), e depois (B) do tratamento com solução FAA	82
Figura 3-26. Relação entre variação do tamanho do metaxilema com a retração da amostra infiltrada com solução GA	85
Figura 3-27. Relação entre variação do tamanho do metaxilema com a retração do espécimen infiltrado com solução FAA	85
Figura 3-28: Relação entre variação do tamanho do metaxilema com a retração da amostra utilizada como testemunha térmica	86
Figura 3-29. Curva típica Tensão-Deformação no ensaio de compressão paralela às fibras.	93
Figura 3-30. Diagramas de caixa dos valores de resistência (fc_p) obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras.	96
Figura 3-31. Diagramas de caixa dos valores de módulo de elasticidade (E) obtidos por ensaio de compressão paralela às fibras.	97
Figura 3-32. Resistência a compressão paralela às fibras em função da densidade.	100
Figura 3-33. Resistência a compressão paralela às fibras em função do teor de umidade.	101
Figura 3-34. Curva de tensão contra deformação durante o ensaio de compressão perpendicular às fibras.	102
Figura 3-35. Curva de tensão contra deformação durante o ensaio de compressão perpendicular às fibras.	104

Figura 3-36. Diagramas de caixa dos valores de módulo de elasticidade obtidos por ensaio de compressão perpendicular às fibras.	105
Figura 3-37. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras na condição natural.	106
Figura 3-38. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do teor de umidade das amostras natural.	107
Figura 3-39. Curva de Carga – Deslocamento do corpo de prova ensaiado em flexão.	109
Figura 3-40. Diagramas de caixa dos valores de resistência (f_{cf}) obtidos no ensaio de resistência à flexão.	112
Figura 3-41. Diagramas de caixa dos valores de módulo de elasticidade (E) obtidos no ensaio de resistência à flexão.	112
Figura 3-42. Resistência à flexão em função da densidade das amostras na condição natural.	114
Figura 3-43. Resistência à flexão em função do teor de umidade das amostras na condição natural.	115
Figura 3-44. Imagens obtidas no microscópio óptico sobre as seções transversais e longitudinais das amostras de <i>B. vulgaris</i> .	117
Figura 3-45. Imagens de cortes transversais e axiais das amostras de <i>B. vulgaris</i> obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).	118
Figura 3-46. Difrátograma comparativo das amostras de <i>B. vulgaris</i> Natural e com diferentes processos de infiltração e impregnação.	120
Figura 3-47. Termogramas registrados na faixa entre 20 e 150 °C.	123
Figura 3-48. Termogramas registrados na faixa entre 25 e 450 °C.	124
Figura 3-49. Termograma obtido por TGA sobre as amostras com e sem tratamento.	125
Figura 3-50. Curva derivada DTGA das amostras.	126
Figura 3-51. Espectros na região do infravermelho das amostras de bambu natural e as tratadas quimicamente.	128
Figura 3-52. Ensaio de absorção de água usando corpos de prova de <i>B. vulgaris</i> com e sem tratamentos térmico e químico.	129
Figura 3-53. Fotografias das amostras submetidas a contato com <i>Dinoderus minutus</i> em condições ambientais.	134
Figura 3-54. Cortes transversais do colmo de <i>B. vulgaris</i> infiltrado com solução alcalina e tingido com fenolftaleína.	134
Figura 3-55. Sistemas de infiltração de substâncias sob pressão.	135
Figura 3-56. Fotografias dos colmos na condição natural e infiltrados sob pressão com diferentes tratamentos.	136
Figura 3-57. Fotografias de cortes cilíndricos de colmos impregnados com SM e SMB deixados à intempérie por 6 meses.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Constantes cinéticas dos monômeros em função da temperatura.	7
Tabela 2-2: Constantes cinéticas dos iniciadores com tolueno e com monômeros de estireno.	8
Tabela 2-3 Constantes aparentes de propagação e projeção do tempo de polimerização a 60°C em tolueno.	23
Tabela 2-4. Porcentagem de conversão do poli(St-co-MMA-co-BuA) em função da concentração do iniciador.	24
Tabela 2-5. Porcentagem de conversão do poli(St-co-MMA-co-BuA) em função da temperatura.	25
Tabela 2-6. Valores de densidade e da viscosidade em relação à conversão durante a polimerização.	30
Tabela 3-1. Distribuição e rotulagem das amostras de bambu <i>B. vulgaris</i> .	61
Tabela 3-2: Dimensões dos colmos e fluxo de água através deles.	72
Tabela 3-3. Variação da massa nos colmos em relação ao fluxo de água.	73
Tabela 3-4. Secagem das amostras infiltradas com água.	75
Tabela 3-5. Análise estatística das amostras infiltradas com solução GA.	79
Tabela 3-6. Análise estatística das amostras infiltradas com solução FAA.	79
Tabela 3-7. Análise estatística das amostras tratadas termicamente sem infiltração.	80
Tabela 3-8. Variação do diâmetro dos vasos de metaxilema com a infiltração de solução de glutaraldeído.	83
Tabela 3-9. Variação do diâmetro dos vasos de metaxilema com a infiltração de solução FAA.	83
Tabela 3-10. Variação do diâmetro dos vasos de metaxilema com o tratamento térmico.	84
Tabela 3-11. Descrição das amostras impregnadas com copolímeros.	87
Tabela 3-12. Variação porcentual dos parâmetros analisados nas amostras impregnadas com copolímeros para ensaios de compressão paralela às fibras.	88
Tabela 3-13. Variação porcentual dos parâmetros analisados nas amostras impregnadas com copolímeros para ensaios de compressão perpendicular às fibras.	88
Tabela 3-14. Variação porcentual dos parâmetros analisados nas amostras impregnadas com copolímeros para ensaios de flexão.	89
Tabela 3-15. Parâmetros de caracterização do ensaio de resistência a compressão paralela às fibras (Cp) para as amostras de bambu em sua condição natural.	94
Tabela 3-16. Parâmetros avaliados durante os ensaios a compressão paralela às fibras (Cp).	95
Tabela 3-17. Variação porcentual em relação aos espécimens de referência em sua condição natural do ensaio de compressão paralela às fibras (Cp).	98
Tabela 3-18. Fatores de linearidade dos gráficos de resistência à compressão paralela às fibras (f_{Cp}) em função da densidade.	100
Tabela 3-19. Fatores de linearidade dos gráficos de resistência em função do teor de umidade nas amostras ensaiadas em compressão paralela às fibras.	101
Tabela 3-20. Parâmetros de caracterização do ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras para as amostras denominadas de natural.	102
Tabela 3-21. Parâmetros avaliados durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras. (Cr).	103

Tabela 3-22. Variação porcentual em relação aos espécimens de referência em sua condição natural do ensaio de compressão perpendicular às fibras.	105
Tabela 3-23. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função da densidade nas amostras ensaiadas à compressão perpendicular às fibras.	106
Tabela 3-24. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função do teor de umidade nas amostras ensaiadas à compressão perpendicular às fibras.	107
Tabela 3-25. Parâmetros de caracterização do ensaio de resistência à flexão para as amostras na condição natural.	110
Tabela 3-26. Parâmetros avaliados durante os ensaios de resistência à flexão.	111
Tabela 3-27. Variação porcentual em relação aos corpos de prova de referência em sua condição natural do ensaio de resistência à flexão.	113
Tabela 3-28. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função da densidade nas amostras do ensaio de resistência à flexão.	114
Tabela 3-29. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função do teor de umidade nas amostras do ensaio de resistência a flexão.	115
Tabela 3-30. Influência dos tratamentos químicos de infiltração e de impregnação sobre o grau de cristalinidade do material lignocelulósico do bambu <i>B. vulgaris</i> .	122
Tabela 3-31. Porcentagem de absorção de água dos corpos de prova de <i>B. vulgaris</i> .	130
Tabela 3-32. Variação porcentual da absorção de água nos corpos de prova a diferentes tempos de imersão em relação as amostras em sua condição natural.	131
Tabela 3-33. Variação porcentual da expansão da espessura (h) das amostras tratadas em relação com as amostras em sua condição natural em diferentes tempos de imersão.	131
Tabela 3-34. Variação porcentual da expansão da largura (b) das amostras em diferentes tempos de imersão, em relação a àquelas na condição natural,	132
Tabela 3-35. Variação porcentual do volume (V) das amostras sob diferentes tempos de imersão em relação às amostras em sua condição natural.	132

A contribuição paisagística que o bambu brinda às obras arquitetônicas, suscitando um ambiente natural e rústico, valoriza o uso desta gramínea gigante como material de construção, sendo sua aplicação limitada pelas propriedades mecânicas, durabilidade e demais características próprias de cada espécie. Com base em pesquisas anteriores, pode-se afirmar que o bambu *B. vulgaris Schrad* apresenta ótimas propriedades mecânicas, porém mostra baixa resistência ao ataque do inseto *Dinoderus minutus* e aos fungos apodrecedores, o que limita sua aplicação como elemento estrutural. Sendo essa espécie de bambu a mais difundida no Nordeste Brasileiro, esta pesquisa tem como objetivo aproveitá-la adequadamente, através do estudo do efeito da impregnação interna do bambu com polímeros sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade dos colmos.

As deficiências referenciadas a seguir foram verificadas experimentalmente para os colmos do bambu *B. vulgaris*, e através do intercâmbio de informação com reconhecidos pesquisadores no tema do bambu, da participação em eventos internacionais que abordavam esse tópico, e apoiada em uma ampla revisão bibliográfica. A seguir, mencionam-se alguns dos pontos do bambu e que são matéria de estudo neste trabalho:

- a. O desempenho estrutural do colmo do bambu é afetado pela decomposição do tecido vegetal, sendo que algumas substâncias que o constituem como: ceras, amido e açúcares, são foco de atração para insetos, fonte para o desenvolvimento de fungos xilófagos, ou servem como iniciadores de reações bioquímicas que deterioram o material.
- b. As células que compõem o tecido vegetal contêm celulose, substância que aporta grupos hidroxilo capazes de absorver umidade e de exercer um efeito direto sobre a variação dimensional e a degradação do colmo.

- c. O processo de infiltração de substâncias no interior do bambu é restrito devido às membranas microporosas que apresenta o tecido parenquimático, as quais limitam o fluxo pelas estreitas cavidades que os interconectam. Também há dificuldades de impregnação pelos vasos condutores de seiva, os quais chegam a representar cerca de 10% do volume total do colmo, dispendo-se paralelamente ao eixo longitudinal dos colmos, apresentando algumas descontinuidades na região dos nós, dificultando a impregnação interna homogênea do material.
- d. No Brasil e em outras regiões tropicais, existem grandes extensões de bambuzais geralmente em condições de cultivo inadequadas, o que intensifica as deficiências dos colmos e termina com a rejeição do material. Para esse caso, a impregnação com polímeros torna-se uma alternativa viável para seu aproveitamento racional.

Tendo em vista os itens anteriores e as referências bibliográficas que destacam ainda certa ineficácia dos tratamentos de preservação, e por outro lado, os avanços na produção de materiais compósitos usando matrizes poliméricas, implementou-se neste trabalho a produção do bambu impregnado com polímeros, com o objetivo de avaliar um método de polimerização *in situ* que corroborara a hipótese do que a impregnação do tecido interno do bambu *B. vulgaris* com o copolímero poli(St-co-MMA) adicionado com o acrilato de butila, alcançava diminuir a absorção da umidade, aumentar a resistência à degradação e melhorar a resistência à flexão e a compressão paralela e perpendicular às fibras.

A avaliação e a implementação desta proposta de doutorado foram desenvolvidas na Universidade Federal da Paraíba, em associação com a Universidad Nacional de Colombia. A justificativa para a utilização dos monômeros de estireno e de metacrilato de metila se baseia na fácil aquisição, no relativo baixo preço, nos antecedentes bibliográficos sobre o tema de estudo, nas propriedades mecânicas adequadas para os fins propostos e na afinidade físico-química deles com a matriz vegetal.

A metodologia, a hipótese e os resultados deste trabalho são detalhados nos capítulos que compõem esta tese e cuja estrutura se resume a seguir:

No presente capítulo, se apresenta uma introdução geral à pesquisa, uma justificativa, os objetivos e a hipótese geral desta tese doutoral.

No capítulo 2, *Síntese e caracterização dos copolímeros*, se explica o processo de polimerização dos monômeros individualmente e em diferentes misturas, a influência das velocidades de reação dos diferentes homopolímeros e copolímeros. Além de apresentar os resultados da caracterização do material polimérico por dilatometria, viscosimetria, análise calorimétrica, e resistência à compressão, valores que foram referências para comparação com o compósito bambu-polímero.

No capítulo 3, *Impregnação do Bambu B. vulgaris com polímeros e suas propriedades*, se apresenta ao leitor uma visão geral sobre o bambu. Apresenta-se uma sinopse da sua classificação taxonômica dentro da família das *Poaceae*, e se realiza a descrição do tecido parenquimático, esclerenquimático e dos feixes vasculares que compõem o bambu, com foco sobre o transporte de substâncias no interior e nos espaços livres do tecido nos quais é possível ocorrer a polimerização *in situ*. Apresenta-se também uma síntese da infiltração com substâncias fixadoras de tecidos, e da impregnação de monômeros com posterior polimerização *in situ* no interior do bambu. Também se apresentam resultados de alguns ensaios físicos e mecânicos de caracterização do compósito de bambu-polímero. Faz-se referência também aos antecedentes das técnicas de impregnação e de caracterização de materiais compósitos estudados previamente por outros autores, empregando diversas misturas poliméricas, e tecidos vegetais originários de outras espécies de bambu e de madeiras.

O capítulo 4, *Conclusões*, resume os resultados obtidos em cada um dos capítulos anteriores. Apresenta-se uma discussão resumida dos dados que permitem propor novas alternativas para reforçar esta tese em futuros trabalhos de pesquisa.

No final, apresentam-se os Anexos, onde se informa em detalhe os resultados ou procedimentos mencionados nos capítulos anteriores.

No entanto, antes de abordar os capítulos que definem os resultados deste trabalho, apresenta-se a justificativa e os objetivos sobre os quais se centra esta investigação.

1.1 Justificativa

O crescimento do uso dos materiais renováveis nas diferentes estruturas dentro da engenharia civil e da arquitetura, além de contribuir para diminuir os problemas ambientais causados pela exagerada produção e consumo de materiais industrializados, geradores de resíduos, é uma tendência internacional que visa a aproveitar a harmonia que os recursos naturais brindam às construções e ao paisagismo.

No Brasil, durante os últimos anos, os recursos renováveis e sustentáveis como o bambu *B. vulgaris* têm tido um aumento de aplicação no setor da construção urbana e rural, além das aplicações tradicionais como a fabricação de papel, artesanato, vara-de-pescar, etc. Apesar de ainda não ter sido superado definitivamente os problemas associados à baixa durabilidade, à excessiva absorção de água, a resistência mecânica variável e a insuficiente adesão às matrizes circundantes.

A demanda por bambu no mercado global é alta, inclusive em grandes obras como o aeroporto de Barajas em Madri, Espanha, o qual tem o bambu, na forma de laminado colado, como elemento de revestimento, dando ao ambiente um aspecto agradável. No entanto, em geral, tem-se pouca oferta desse material com a qualidade apropriada para ser aplicado nos processos de construção. Os cultivos de bambu em maioria são esporádicos e sem a silvicultura adequada para fins comerciais. Neste ponto, se reconhece a necessidade de desenvolver uma transferência de tecnologia permitindo criar consciência da gestão e a utilização adequada de esse recurso natural (Espinell *et al.*, 2005). Com esse pensamento, no país já existe uma Rede Brasileira do Bambu (RBB), reunindo pesquisadores identificados com a planta, com o intuito de desenvolver a cadeia produtiva do bambu, e a Associação Brasileira dos Produtores de Bambu (APROBAMBU), para fomentar plantações e fazer com que brevemente haja disponibilidade desse material para seu uso em maior escala.

A ciência dos materiais oferece alternativas capazes de promover a modificação de matrizes lignocelulósicas, das fibras naturais ou das peças extraídas do material vegetal, com o objetivo de melhorar suas propriedades, e de ampliar sua aplicação industrial. Tome-se, como exemplo, a impregnação com polímeros em lâminas de bambu, utilizando monômeros de metacrilato de metila para diminuir a proliferação de fungos, e de promover a adesão em peças laminadas usando resinas de fenol-formaldeído (Preechatiwong *et al.*, 2006). Esse tipo de resina foi empregado também nas impregnações realizadas em corpos de prova de bambu em sistemas a vácuo, conseguindo aumentar a resistência à compressão das lâminas analisadas (Anwar *et al.*, 2009).

Os trabalhos que incluem a impregnação de pequenos corpos de prova de madeira são difundidos em maior proporção do que no bambu. Assim, a modificação química do material lignocelulósico das peças extraídas da Seringueira (*Hevea brasiliensis*), infiltradas e polimerizadas com monômeros de estireno junto com um agente de reticulação em sistema ao vácuo, diminuiu a absorção da água e a retração pós-secagem, enquanto que o módulo de elasticidade aumentou (Rashmi, *et al.*, 2003).

Recapitulando, o bambu como material renovável requer de modificações biológicas, físicas ou químicas para aumentar sua durabilidade e ampliar o seu leque de aplicações. Pelo citado, esta tese apresenta o processo de impregnação com monômeros de metacrilato de metila e de estireno, avaliando o papel do acrilato de butila como agente plastificante no copolímero, com o objetivo de analisar o efeito que a impregnação com esses copolímeros pode exercer sobre as propriedades físicas e mecânicas dos colmos de bambu *B.vulgaris Schrad.*

Embora o uso dos monômeros mencionados tenha sido publicado em pesquisas sobre impregnação de bambu e da madeira; sem abordarem o terpolímero SMB, o qual é próprio deste trabalho. Pelo fato de seguir um mecanismo de polimerização por radicais livres, a umidade residual das fibras e a falta de transporte radial de substâncias no interior do tecido poderiam comprometer o processo de infiltração e a própria impregnação do bambu.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do trabalho foi avaliar o efeito que a impregnação com poli(St-co-MMA) e poli(St-co-MMA-co-BuA) tem sobre a resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras, a resistência à flexão, a absorção da água e a variação dimensional de corpos de prova extraídos de colmos de *B. vulgaris Schrad.*

Os objetivos específicos foram:

- Obter e caracterizar os copolímeros poli(estireno-co-metacrilato de metila) e poli(estireno-co-metacrilato de metila-co-acrilato de butila), e avaliar o efeito que produz o acrilato de butila na resistência à compressão e na temperatura de transição vítrea do copolímero.
- Caracterizar morfologicamente as amostras do *B. vulgaris* avaliando a variação do tamanho dos vasos de metaxilema durante o processo de infiltração de substâncias fixadoras de tecidos.
- Impregnar os pequenos corpos de prova do *B. vulgaris* com os copolímeros, infiltrando os monômeros pela adaptação da norma ASTM 1413-99 e seguindo uma polimerização *in situ* ativada termicamente.
- Caracterizar o novo material compósito bambu-polímero por meio de ensaios físicos-mecânicos.

1.3. Hipótese

A impregnação com polímeros dentro do material lignocelulósico do tecido vegetal do *B. vulgaris* melhora suas propriedades físico-mecânicas.

2. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS

2.1. Processo de polimerização

Os polímeros termoplásticos são materiais amplamente utilizados na indústria, tendo em vista suas diversas aplicações e sua possibilidade de reprocessamento. No entanto, em alguns casos, com o fim de diminuir os custos de produção ou para modificar suas propriedades, realizam-se misturas com outros monômeros, como é o caso do polimetacrilato de metila (PMMA), que apresenta ótimas qualidades de transparência e de leveza, porém ele é geralmente misturado com outros polímeros para tornar o processo mais econômico. Uma das opções mais viáveis devido à afinidade química entre os monômeros, é a mistura com estireno, embora com isso se afete a resistência ao impacto ou a rigidez do novo copolímero conformado (Van Melick *et al.*, 2003). Uma das alternativas para melhorar as propriedades de elasticidade dos copolímeros de cadeias rígidas, é a adição de agentes plastificantes, que além de melhorar o processamento do material (Gloaguen *et al.*, 1995), tem a vantagem de diminuir a temperatura de transição vítrea (Cerrada *et al.*, 2001).

As constantes cinéticas de homopolimerização e copolimerização do estireno e do metacrilato de metila se apresentam na Tabela 2-1, notando-se a limitada informação sobre o acrilato de butila, apesar de seu amplo uso em tintas e em outros processos industriais.

Tabela 2-1: Constantes cinéticas dos monômeros em função da temperatura.

Constante cinéticas ^(a)	Monômeros		
	Estireno ^(b) (x10 ⁻⁷)	Metacrilato de metila ^(b) (x10 ⁻⁷)	Acrilato de butila ^(c*) (x10 ⁻³)
K_p60°C	0,00165	0,00515	-----
K_t60°C	6,00	2,55	-----
K_p50°C	0,0148	0,0446	K _p / K _t ^{1/2} = 2,25
K_t50°C	5,49	2,23	
K_p40°C	0,114	0,330	----
K_t40°C	4,99	1,94	-----

(a) Constantes expressadas em (L/mol.s).

(b) Hiemenz P.C. (1984). Constantes referidas a 60°C, ajustadas pela Equação de Arrhenius.

(c*) Fernández García M. (1995). Relação das constantes cinéticas de propagação e de terminação.

Os monômeros vinílicos, como o estireno, e os acrílicos, como o metacrilato de metila, seguem o processo de polimerização de crescimento em cadeia (Rawe, 2000), a partir de radicais livres de iniciadores, tais como o peróxido de benzoila (BPO), geralmente em concentrações inferiores a 2%, com a finalidade de evitar as reações de autoaceleração. A natureza do iniciador, o solvente e as condições térmicas afetam as constantes de dissociação do iniciador, como é mostrado na Tabela 2-2. Note-se que quando a temperatura aumenta, a constante de dissociação aumenta, e com o uso do solvente, as constantes diminuem.

Tabela 2-2: Constantes cinéticas dos iniciadores com tolueno e com monômeros de estireno.

Constante cinética	Iniciadores	
	AIBN ($\times 10^{-7}$)	PBO($\times 10^{-7}$)
$K_{d\text{Tolueno}/60^\circ\text{C}}$	0,998	0,385
$K_{d60^\circ\text{C}}$	0,0113	0,0275
$K_{d\text{Tolueno}/50^\circ\text{C}}$	0,252	9,69
$K_{d50^\circ\text{C}}$	0,26	0,223
$K_{d\text{Tolueno}/40^\circ\text{C}}$	5,83	2,23
$K_{d40^\circ\text{C}}$	-----	-----

Valores relatados em (s^{-1}), (Odian G.,1991) e corrigidos utilizando a Equação de Arrhenius.

A produção de polímeros exposta neste trabalho se refere a reações de polimerização em solvente. Portanto, algumas das equações e constantes necessárias para os cálculos se apresentam a seguir.

A polimerização em cadeia é determinada inicialmente pela taxa de dissociação, e a concentração do iniciador, como mostrado na Equação 2-1:

$$R_i = 2fK_d[I]^{1/2} \quad \text{Eq. 2-1}$$

Onde f é a eficiência do iniciador, que para o PBO se assume como 0,80 (Kent e Riegel's, 2007). K_d é a constante de dissociação, e $[I]$ é a concentração molar do iniciador.

Ao longo da propagação, a taxa de polimerização é limitada pela concentração de monômero e de iniciador ($[M]$), e pelo solvente incorporado (Hiemenz, 1984), sendo esta a etapa marcante da cinética da reação descrita pela Equação 2-2.

$$R_p = [M][M\cdot] = -\frac{d[M]}{dt} \quad \text{Eq. 2-2}$$

Em geral, a etapa de terminação da polimerização depende da combinação entre os diferentes radicais presentes. A Equação 2-3 descreve esta fase final com base na constante de terminação (K_t) e na concentração dos radicais de monômeros ($[M\cdot]$).

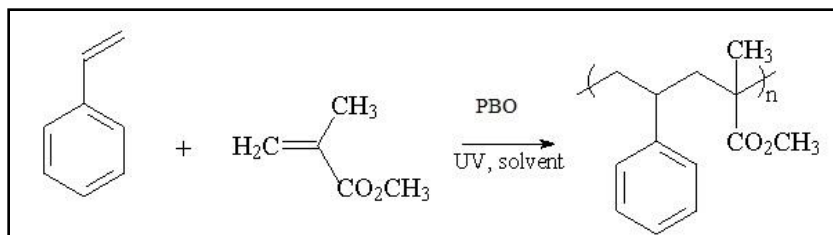
$$R_t = 2K_t[M\cdot]^2 = -\frac{d[M\cdot]}{dt} \quad \text{Eq. 2-3}$$

No item correspondente à discussão de resultados se explicarão as correções das equações apresentadas, e que foram necessárias para realizar os cálculos relativos à taxa de polimerização e de copolimerização.

2.1.1. Copolimerização

A produção de um copolímero, de acordo com qualquer processo de polimerização de radicais livres, inicia-se a partir de moléculas de monômeros insaturados com um elétron não emparelhado (radicais livres), que são formados pela ação de um iniciador com o monômero, e que se propagam, desenvolvendo o seu crescimento em cadeia. Este mecanismo é relativo ao copolímero poli(estireno-co-metacrilato de metila) denominado neste trabalho de SM (Fig. 2-1) e o terpolímero poli(estireno-co-metacrilato-co-acrilato de butila), denominado de SMB.

Figura 2-1: Reação de polimerização entre monômeros de estireno e de metacrilato de metila.



Fonte: adaptado de <http://www.imc.cas.cz/sympo/39micro/poster.htm>

A distribuição e o comprimento da sequência (S) de monômeros no copolímero está relacionada com a variação das concentrações dos monômeros ($\frac{[A]}{[B]}$), e com as constantes de reatividade r_A e r_B . Embora a estrutura específica do copolímero e do terpolímero não tenham feito parte dos objetivos propostos nesta pesquisa, pode-se fazer uma ideia da sequência da estrutura da cadeia polimérica conhecendo-se os valores das razões de reatividade entre os diferentes monômeros nas misturas dos copolímeros. Segundo as referências bibliográficas, assume-se que a cadeia polimérica do copolímero poli(St-co-MMA) é composta por blocos alternados de cada um dos homopolímeros (Teodorescu M., 2002). Por sua vez, nas combinações entre St e BuA, de acordo com valores de reatividade, prevê-se que os monômeros de estireno são consumidos mais rapidamente do que os monômeros do acrilato de butila, porque tem preferência para se unir aos monômeros de estireno e não aos de acrilato de butila (Ziaee *et al.*, 1998); esse mesmo comportamento foi relatado para as misturas entre metacrilato de metila (MMA) e o acrilato de butila (Roos *et al.*, 1999).

2.1.2. Caracterização dos copolímeros

Os polímeros têm uma ampla gama de propriedades físicas, reológicas, mecânicas, térmicas e químicas, que servem como referência para a definição das suas aplicações industriais. Assim que sendo o objetivo final desta tese avaliar a capacidade de impregnar o tecido do bambu com o copolímero SM e o terpolímero SMB, se referenciam a seguir algumas propriedades que permitiriam identificar a presença dos polímeros no material lignocelulósico impregnado.

2.1.2.1. Análise térmica

Baseados nas transições termodinâmicas dos polímeros têm sido desenvolvidas técnicas para medir as alterações relacionadas com a decomposição térmica (Gonçalves e Azevedo, 2009). A temperatura de transição vítrea (T_g) dos copolímeros, por exemplo, se relaciona com as proporções em massa dos monômeros misturados e sua organização na cadeia polimérica (George *et al.*, 1998). Os monômeros de acrilato de butila (BuA), um dos

monômeros utilizados nesta tese, ao ser misturado com ácido polilático (PLA), reduz a Tg e a rigidez do polímero, devido à facilidade de migração das moléculas do BuA na cadeia polimérica. No entanto, já que se tem um limite onde o sistema pode apresentar segregação de fases, não se devendo exceder o valor de 11% da sua concentração (Bing Meng, *et al.*, 2012).

Na análise por termogravimetria (TGA), os polímeros sofrem transformações físicas e químicas em função da temperatura e do ambiente no qual se realiza aquecimento, causando variação na massa durante o processo e produzindo termogramas que indicam as etapas de degradação dos materiais, permitindo fazer as comparações com os outros materiais, em nosso presente caso, com os materiais compostos bambu-polímero.

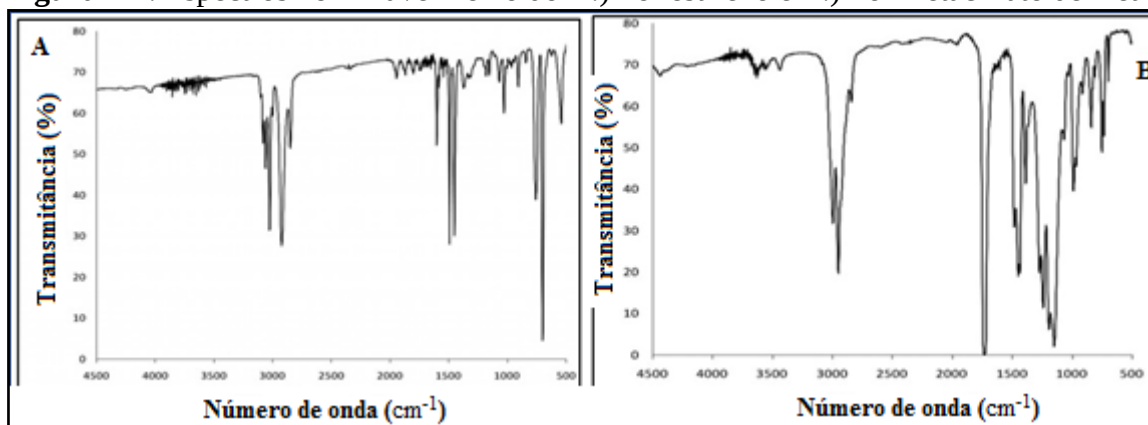
2.1.2.2. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho mede a radiação absorvida pelas moléculas dos grupos que constituem o polímero, dependendo do comprimento de onda irradiada sobre a amostra, no espectro eletromagnético entre 4000 e 400 cm^{-1} . A seguir, são referenciados os espectros dos diversos homopolímeros que fazem parte desta tese, a fim de apoiar a identificação do copolímero poli(St-co-MMA) e do terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA), próprios desta pesquisa, durante a sua caracterização por espectrofotometria no infravermelho.

Kaniappan e Latha (2011) identificaram sobre o espectro de transmitância do poliestireno os principais picos que permitem sua caracterização (Fig. 2-2A). O pico próximo de 3000 cm^{-1} devido às ligações C-H da hibridação sp^2 , o pico em 1630 cm^{-1} da ligação C=C do grupo vinil, entre 1600 e 1440 cm^{-1} , o pico devido à ligação C=C do grupo fenila, na faixa entre 1900 cm^{-1} e 1990 cm^{-1} o pico próprio da ligação C-H das olefinas mono-substituídas, em 776 cm^{-1} e em 697 cm^{-1} os picos referidos à deformação do anel de benzeno.

O espectro no infravermelho do polimetacrilato de metila (Fig. 2-2B) apresentou bandas de absorção em 2951 cm^{-1} e 1736 cm^{-1} , devido ao estiramento assimétrico do grupo $-\text{CH}_3$ e ao estiramento do grupo $\text{C}=\text{O}$, respectivamente. As bandas em 1483 cm^{-1} e 1449 cm^{-1} foram atribuídas à deformação tipo tesoura do grupo $-\text{CH}_2$ e ao estiramento assimétrico do grupo $-\text{CH}_3$. O pico em 1390 cm^{-1} foi devido à deformação do grupo $-\text{OCH}_3$, e o pico em 1273 cm^{-1} e 860 cm^{-1} foram relacionados com os grupos $-\text{C}-\text{O}$ e $\text{C}-\text{O}-\text{C}$.

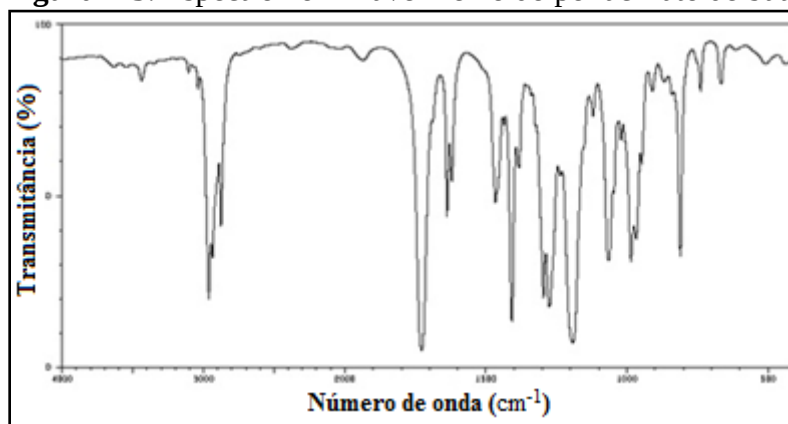
Figura 2-2. Espectros no Infravermelho do A.) Poliestireno e B.) Polimetacrilato de metila.



Fonte: Kaniappan e Latha (2011)

Cerrada *et al.*, (2001) confirmaram a presença do acrilato de butila no copolímero poli(St-co-BuA) por meio da análise dos espectros no infravermelho, identificando as bandas devido ao alongamento do grupo carbonila e ao acrilato em 3000 cm^{-1} e em 700 cm^{-1} , respectivamente, como se observa na Figura 2-3.

Figura 2-3. Espectro no Infravermelho do poliacrilato de butila.



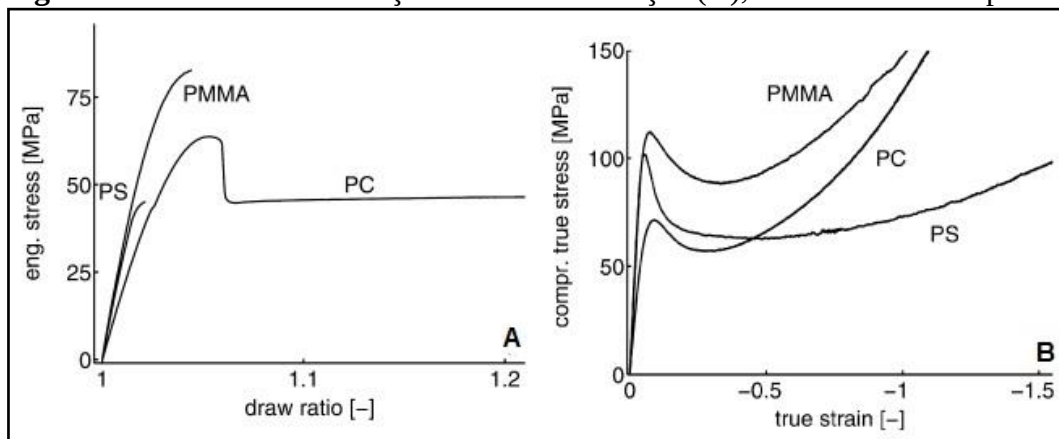
Fonte: Merck Index

2.1.2.3. Propriedades mecânicas

O comportamento típico de deformação dos polímeros é baseado na sua viscoelasticidade, no mecanismo de fratura, na capacidade de absorção de energia e na propagação de fissuras durante o ensaio mecânico. Para efeitos do presente trabalho, apenas se enfatiza na resistência à compressão, sendo este ensaio um dos principais pontos de análise do efeito que causa a impregnação dos corpos de prova com o copolímero poli(St-co-MMA), e com o terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA), sobre as propriedades mecânicas do bambu (Capítulo 3 desta tese).

A deformação obtida nos corpos de prova de polimetacrilato de metila (PMMA), de poliestireno (PSt) e de policarbonato (PC) são apresentadas na Figura 2-4. O ensaio de tração mostrou que o PMMA e o PSt têm um comportamento frágil, enquanto que o PC apresentou um comportamento dúctil. Embora deva ser lembrado que as propriedades dos polímeros são dependentes de sua história térmica. O comportamento dos polímeros sob compressão, também apresentou diferenças na estabilização das amostras com a carga máxima, sendo semelhantes entre o PMMA e PC, mas diferentes ao PSt (Van Melick, *et al.*, 2003).

Figura 2-4. Tensão- Deformação no ensaio de tração (A), e no ensaio à compressão (B).



Fonte: Van Melick *et al.* (2003)

2.2 Metodologia

2.2.1. Copolimerização do poli(*St-co-MMA*) e do terpolímero poli(*St-co-MMA-co-BuA*)

Os reagentes utilizados na copolimerização foram monômeros de estireno, metacrilato de metila e acrilato de butila da empresa BASF. O peróxido de benzoila, tolueno e cloreto de cálcio anidro fornecido pela indústria Merck. Sendo todos reagentes de grau analítico com exceção do monômero de estireno.

Os monômeros foram lavados em triplicata com uma solução de hidróxido de sódio 3%, para remover o inibidor. O excesso de água nos monômeros foi retirado com a adição de cloreto de cálcio anidro. O peróxido de benzoila foi recristalizado a partir de metanol controlando a temperatura a 60°C, utilizando banho de gelo, visto que se trata de uma reação altamente exotérmica.

Os homopolímeros foram produzidos utilizando os monômeros misturados com peróxido de benzoila em concentração de 1,0%, enquanto que o copolímero SM foi produzido a partir de misturas de monômeros de MMA e St em relação 1:1, e o terpolímero SMB a partir de mistura de monômeros de ST, MMA e BuA em relação 2:2:1, misturados com 1,0% de PBO. A temperatura de polimerização em todos os processos foi fixada em 50°C.

2.2.2. Dilatometria

O avanço da polimerização foi medido usando um dilatômetro de vidro de 50 cm de altura, provido de um capilar interno de 1,0 mm de diâmetro interno (Fig. 2-5). A cinética da reação de homopolímeros e copolímeros de interesse nesta investigação foi avaliada variando-se a quantidade do iniciador em concentrações de 1,0, 2,0 e 4,0% em relação à quantidade de monômeros. A incidência da temperatura de polimerização foi avaliada a 40, 50 e 60°C, apenas utilizando PBO em concentração de 1,0%.

Foram elaboradas misturas de monômero na proporção de 1:1 em massa entre os monômeros de estireno: metacrilato de metila, para o estudo do poli(St-co-MMA), e na proporção de 2:2:1 de monômeros de estireno:metacrilato de metila:acrilato de butila, para o estudo do poli(St-co-MMA-co-BuA); cada mistura foi dissolvida em 40% de tolueno. O iniciador e o agente de transferência de cadeia (dodecylmercaptano) se adicionaram antes de serem transferidos para o dilatômetro. Ao fechar o recipiente que continha a mistura, foi atingida a altura máxima na escala do dilatômetro. O sistema se manteve num banho de água equipado com controle de temperatura. A altura do líquido no capilar foi registrada entre intervalos de 5 min, durante 60 min.

Figura 2-5. Sistema de dilatométrica.



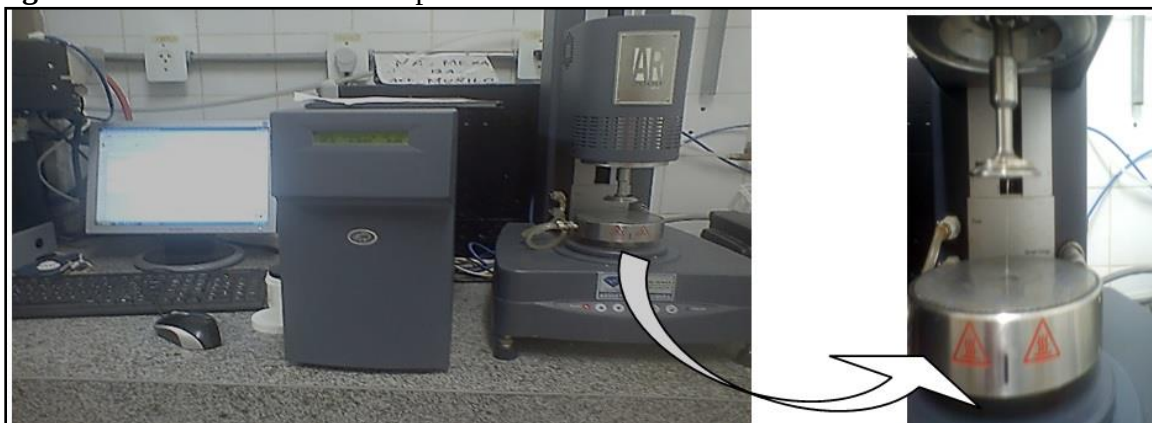
Fonte: própria

Com os resultados obtidos, foi possível conhecer a cinética da reação e o tempo de polimerização, nas diferentes condições experimentais. A análise dos resultados permitiu escolher os melhores parâmetros a serem aplicados na impregnação das amostras do bambu. Foram realizadas lavagens com tolueno para eliminar os resíduos das misturas e impedir o entupimento do tubo capilar, após cada experimentação.

2.2.3. Viscosimetria

A infiltração dos monômeros no interior do bambu e a subsequente polimerização *in situ* requerem misturas com baixa viscosidade, as quais possam fluir dentro do material lignocelulósico. Com a finalidade de conhecer a viscosidade do polimetacrilato de metilo e dos dois copolímeros, SM e SMB, foram polimerizadas amostras utilizando 1% de PBO a 60°C. A viscosidade das amostras foi medida a 25°C no reômetro de placa e cone acoplado com software AR 2000 (Fig. 2-6) utilizando-se o cone de 40 mm com ângulo de 2°. Aproximadamente 5 mL das misturas em diferentes avanços de polimerização eram removidos após de 1, 2, 4, 6 e 12 h. A reação de polimerização nas alíquotas extraídas foi inibida com solução de 1000 ppm de hidroquinona em álcool. O programa de medição foi ajustado com as seguintes condições: velocidade de corte inicial de 10 rad/s por 10 s, sendo logo aumentada para 6280 rad/s durante 600 s e o cisalhamento foi programado em 0,1134 Pa. Os resultados de viscosidade obtidos foram plotados em função do tempo. Algumas amostras apresentaram alta viscosidade, como se indica com a seta na Figura 2-6.

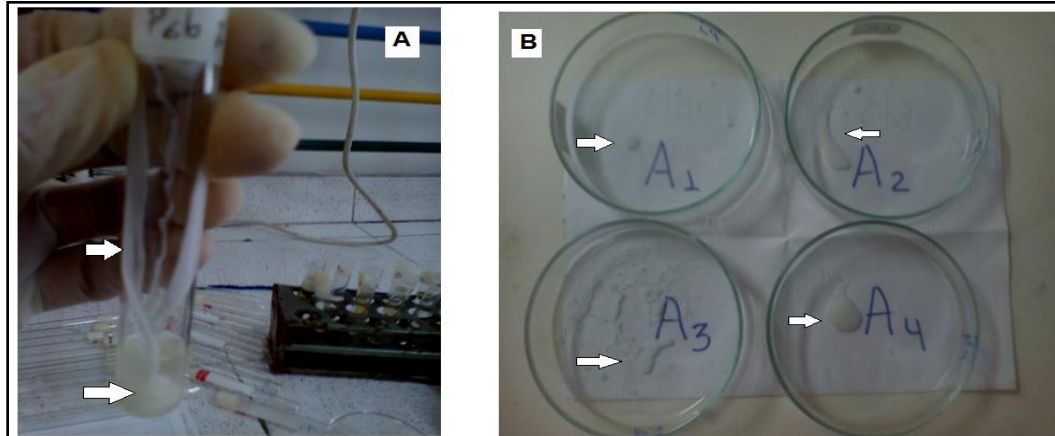
Figura 2-6. Reômetro de cone e placa AR 2000.



Fonte: Própria

Na mesma ordem em que a viscosidade era avaliada, eram retiradas amostras de 5,0 mL para ser precipitadas com 25 mL de metanol arrefecido até 4°C. Como se mostra na Figura 2-7, as amostras foram precipitadas em tubos de ensaio e, em seguida, transferidas para placas de Petri com o fim de acelerar a evaporação dos solventes à temperatura ambiente. Os valores da massa inicial e a massa final foram empregados para determinar a quantidade de monômero polimerizado em função do tempo.

Figura 2-7. Polímero precipitado com metanol (A), e determinação de sólidos para diferentes tempos de polimerização do sistema poli(St-co-MMA-co-BuA) (B).



Fonte: Própria

2.2.4. Microscopia eletrônica de varredura (SEM) –adaptada de Gebizlioghu et al. (1990).

A morfologia exibida pelo polímero foi analisada nas mesmas condições das amostras do bambu *B. vulgaris*, apresentada no Capítulo 3 da presente tese. As microfotografias foram utilizadas como material de referência para identificar a impregnação dos polímeros no material lignocelulósico. A estrutura dos copolímeros SM e SMB foi microfotografada sobre os cortes criogênicos empregando-se o microscópio eletrônico de varredura (SEM), modelo Leo 1430 Zeiss, ao vácuo, de corrente 120 pA, e tensão de aceleração de 10kV. As amostras foram colocadas em nitrogênio líquido durante 10 min, para que fossem fraturadas e revestidas com ouro, antes de serem observadas no microscópio. As microfotografias foram obtidas com ampliações de 500, 1000 e 2000x.

2.2.5. Calorimetria de varredura diferencial (DSC)- Adaptada de Bing Meng et al. (2012)

A temperatura de transição vítrea (T_g) foi projetada através da Equação de Fox (Eq. 2-4), sendo W_A e W_B, as frações em massa dos monômeros nas misturas e T_{gA}, T_{gB} as respectivas temperaturas de transição vítrea.

$$\frac{1}{T_g} = \frac{W_A}{T_{gA}} + \frac{W_B}{T_{gB}} \quad \text{Eq. 2-4}$$

A temperatura de transição vítrea dos polímeros e copolímeros foi determinada a partir de, aproximadamente 4,0 g., das amostras em pó, passadas através de uma peneira de 200 mesh. Empregando-se o DSC-60 Shimadzu, com um fluxo de 50 mL/s de argon e com velocidade de aquecimento de 10°C/min na faixa de temperaturas entre 25 e 450°C.

2.2.6 Análise termogravimétrica (TGA) -Adaptada de Leskovac et al. (1999).

Amostras de, aproximadamente, 5,0 mg de material em pó, passadas por peneira de 200 mesh, foram analisadas no DTG Shimadzu-60H utilizando-se uma cápsula de platina num ambiente de argon, com fluxo de gás de 50 mL/s, com taxa de aquecimento de 20°C/min.

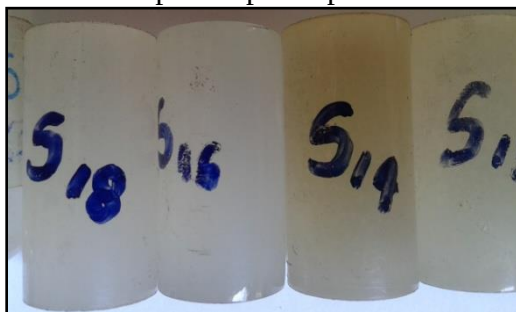
2.2.7 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier- adaptada de Cerrada. et al. (2001)

O método utilizado para esta análise foi adaptado daquele aplicado ao compósito de bambu-polímero, a fim de serem obtidos resultados que permitiam o cotejo ou a comparação entre os mesmos. Amostras dos polímeros, passadas por peneira de 200 mesh, e misturadas com cerca de 2,0% de cloreto de potássio foram comprimidas sob pressão para elaborar as pastilhas de polímeros. O material assim preparado foi analisado no espectrómetro Shimadzu, modelo: FTIR-8400S, série IRAffinity-1, acoplado com o módulo HATR MIRacle e prisma de ZnSe. As análises foram realizadas na região de 4000 a 600 cm⁻¹, utilizando-se 32 varrimentos e resolução de 4 cm⁻¹.

2.2.8. Ensaio de compressão- Adaptado de Manrich Silvio (2005), de acordo com a norma ASTM D-695

Os corpos de prova foram produzidos em tubos de vidro de 12,7 mm de diâmetro, adotando-se os procedimentos de homopolimerização e de copolimerização já descritos no item 2.2.1. Após do endurecimento do polímero, foram cortados os corpos de prova em proporção 1:2 entre diâmetro:altura, como se observa na Figura 2-8. O ensaio de compressão foi realizado na máquina de ensaios universal, Computer Servo Control Material sobre amostras cilíndricas, aplicando-se a carga sobre as faces paralelas, com velocidade de 5 mm/min. Testing Antes do ensaio, os corpos de prova foram aquecidos a 40°C durante 30 min para corrigir os efeitos de memória térmica ou mecânica do polímero.

Figura 2-8. Corpos de prova para ensaios a compressão.



Fonte: Própria

2.3 Resultados e Discussão

O produto obtido da copolimerização dos monômeros de estireno e metacrilato de metila, o poli(St-co-MMA), será denominado de SM e o terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA) será assumido como SMB, para fins práticos de leitura em este trabalho. Tais copolímeros, foram planejados de acordo com certos parâmetros de produção, relacionados com a consecução do objetivo geral desta tese, entre eles os seguintes:

- Combinar as características do estireno e o metacrilato de metila no copolímero SM.
- Reduzir a rigidez do SM, adicionando monômeros de acrilato de butila para aumentar a plasticidade do terpolímero SMB.
- Manter a Tg do SMB a uma temperatura de, aproximadamente, 60°C.
- Adotar baixas temperaturas de polimerização.
- Obter misturas de monômeros de baixa viscosidade.
- Fornecer um polímero com afinidade pelos componentes lignocelulósicos.

2.3.1. Processo de polimerização

A fim de produzir e caracterizar o SMB se estudou inicialmente a cinética da polimerização dos homopolímeros, poliestireno e polimetacrilato de metila, por meio de: dilatometria, gravimetria e viscosidade. Os resultados obtidos nestes ensaios permitiram identificar os parâmetros ótimos para conseguir a impregnação das amostras de bambu.

2.3.1.1. Dilatometria

No início da polimerização, em baixas conversões, inferiores a 10%, há um equilíbrio entre a iniciação e a finalização da polimerização, chamado de estado estacionário, onde:

$$R_i = R_t \quad \text{Eq 2-5}$$

Assim que:

$$2fk_d[I] = 2kt[M\cdot]^2 \quad \text{Eq. 2-6}$$

E, portanto:

$$[M \cdot] = \left[\left(\frac{fK_d[I]}{Kt} \right) \right]^{1/2} \quad \text{Eq. 2-7}$$

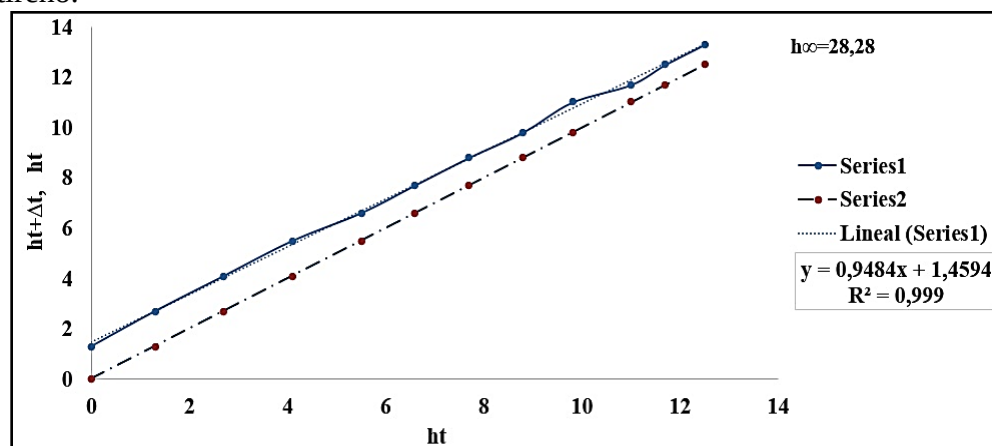
A Equação 2-7 é a base para o estudo da cinética da reação de polimerização mediante a análise por dilatometria. Sendo f , a eficiência do iniciador, valor que será utilizado como 0,80 ao se usar PBO (O'dian G. 1991), a constante de disociación K_d , e a concentração molar do iniciador $[I]$.

Em taxas de conversão abaixo de 10%, através da representação gráfica de $\ln((h_0 - h_\infty)/(h_t - h_\infty))$ contra o tempo, sendo h_0 a altura inicial medida no dilatômetro, h_t a altura depois de um tempo t , e h_∞ a altura final obtida durante o tempo de estudo da reação, foram obtidos gráficos lineares, que indicaram reações de polimerização de primeira ordem nesse grau de polimerização (Stuart, 2002). A inclinação (m) do gráfico de $\ln((h_0 - h_\infty)/(h_t - h_\infty))$ contra o tempo, é expressada pela Equação 2-8, na qual, ao serem substituídos os valores de f , k_d e $[I]$, torna-se possível conhecer o valor da taxa de polimerização experimental, a partir de $k_p/k_t^{1/2}$.

$$m = k_p \left(\frac{fK_d[I]}{k_t} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 2-8}$$

A curva obtida na polimerização do estireno durante os primeiros 60 min de polimerização se apresenta na Figura 2-9. O valor de h_∞ , que na verdade é um valor extrapolado no gráfico, se obteve aplicando o método de Kezdy-Swimbourne, tomando medições em intervalos iguais de tempo (Δt), e representando graficamente os dados como $h_{\Delta t}$ vs h_t ; junto com uma linha reta a partir h_t vs h_t , o valor da interseção das linhas indicou o valor da h_∞ . Conhecendo os valores de h_∞ , foram traçados os gráficos de $\ln(h_0 - h_\infty)/(h_t - h_\infty)$ em função ao tempo (Δt), e o valor da inclinação do gráfico forneceu as informações sobre a taxa aparente de polimerização, tal como se referiu na Equação 2-8.

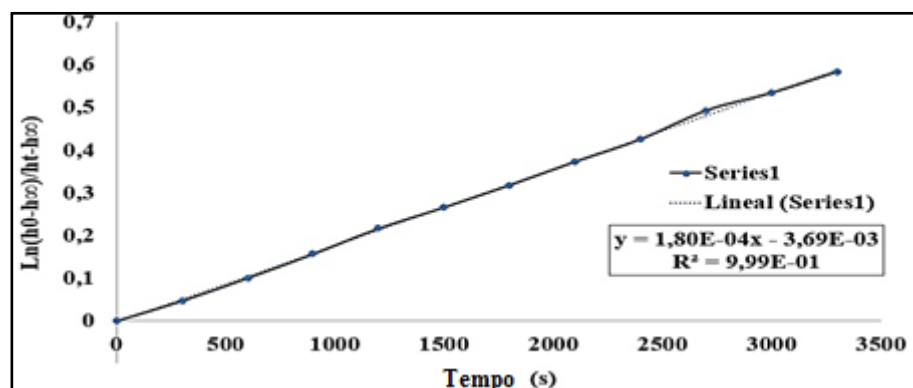
Figura 2-9. Método Kezdy-Swimbourne para calcular $h\infty$, aplicado à polimerização do poliestireno.



* Polimerização em massa do poliestireno a 60°C. – Fonte própria.

O gráfico referente à polimerização do estireno é apresentado na Figura 2-10, exibindo um valor da inclinação de $1.80 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Assim, a partir dos dados experimentais obtidos, e com o valor de K_d referenciado na Tabela 2-2, assumindo a concentração do iniciador como 0.037M e a eficiência do iniciador como 0,58M, se obteve o valor da relação $K_p/K_t^{1/2}$, utilizada como parâmetro de comparação com os dados referidos por outros autores. Experimentalmente se obteve o valor de $2.39 \times 10^{-1} \text{ L}^{1/2} \text{ mol}^{-1/2} \text{ s}^{-1/2}$, que demonstra uma alta aproximação com o valor de $2.13 \times 10^{-1} \text{ L}^{1/2} \text{ mol}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$, relatado por Hiemenz (1984) para o mesmo sistema.

Figura 2-10. Método de Kesdy-Swimbourne para determinar a K_{ap} na polimerização do poliestireno.



Os gráficos foram traçados para todos os sistemas em estudo sem eliminação de dados- Fonte própria.

Sendo definido o valor da constante aparente de polimerização, pode-se extrapolar o tempo de polimerização e conhecer-se o progresso da reação, utilizando a Equação 2-9 (Stuart, 2002):

$$\text{Convers\~ao(\%)} = \frac{w_{m0} - w_m}{w_{m0}} * 100 = \frac{K_{ap} * t}{[M]_0} * 100 \quad \text{Eq. 2-9}$$

Onde W_{m0} é a massa inicial do monômero, W_m é a massa do monômero residual, t é o tempo e $[M]_0$ é a concentração inicial do monômero.

Os sistemas analisados utilizando-se 1,0% de PBO em relação à massa dos monômeros, e proporção de monômero: tolueno de 60:40, foram referenciados na Tabela 2-3, junto com os valores de coeficiente de correlação linear obtidos dos gráficos desenvolvidos para cada sistema. Também se apresenta na Tabela 2-3 o tempo calculado a partir da Equação 2-10, necessário para obter um progresso de 80% da polimerização. Os resultados demonstraram claras diferenças entre os sistemas de homopolímeros e copolímeros. No entanto, se destaca que o tempo calculado trata-se realmente de uma aproximação para o tempo real de polimerização, porque existem fatores, tais como, a viscosidade, a autoaceleração ou efeito Trommsdorff, o efeito do solvente, a eficiência do iniciador na mistura, o efeito das cadeias de transferências, e as relações entre as reatividades específicas dos monômeros envolvidos na copolimerização, que não foram considerados no cálculo.

Tabela 2-3. Constantes aparentes de propagação e projeção do tempo de polimerização a 60°C em tolueno.

Sistema	$[M]_0$	$K_{ap} (s^{-1})(\times 10^{-4})$	Correlação linear (r^2)	$t_{80\% \text{ convers\~ao}}$ (min)
St	5,04	1,80	0,998	370,3
MMA	5,14	2,40	0,993	266,6
BuA	4,15	5,90	0,998	93,89
SM	5,24	1,57	0,954	444,4
SB	4,93	3,02	0,999	218,5
MB	4,74	3,33	0,974	189,7
SMB	5,05	0,673	0,999	1002,5

Os nomes dos copolímeros foram simplificados, tendo-se que S=estireno, M=Metacrilato de metila e B=Acrilato de butila.-Fonte própria

O tempo de polimerização do MMA em 40% de benzeno a 50°C foi de 250 min para um avanço de 20% na polimerização (Kumar *et al.*, 2003). Esse valor foi comparado com os resultados obtidos neste trabalho, utilizando uma temperatura de polimerização de 60°C e tolueno como solvente, de modo que o tempo para atingir 20% da polimerização foi de 66,5 min. Devido à diferença dos parâmetros entre os sistemas, o resultado foi corrigido utilizando-se a Equação de Arrhenius, tendo sido observada uma alta concordância entre os valores experimentais e os referidos na literatura. Em geral, os tempos calculados a 60 e 50°C avaliaram a possibilidade de utilizar os sistemas em estudo no objetivo geral desta pesquisa.

A fim de diminuir o tempo de polimerização dos copolímeros, foram realizados ensaios com diferentes concentrações de peróxido de benzoilo. Os resultados apresentados na Tabela 2-4 demonstraram que o aumento do iniciador ao dobro da sua concentração, diminuiu o tempo de polimerização em torno de 22%, e ao aumentar em quatro vezes a concentração o tempo de reação diminuiu em 47,5%, o que pode ser explicado a partir da relação existente entre a constante cinética e a concentração do iniciador.

O aumento da concentração do iniciador conduz a uma maior concentração de radicais livres que modificam a energia nos sistemas de polimerização com baixas conversões, isto é, a energia de dissociação do iniciador contribui significativamente para a entalpia de polimerização na primeira etapa da reação. Portanto, durante estas polimerizações em massa foi necessária a utilização de tolueno como um agente amortecedor para reduzir a viscosidade, diminuir a concentração de espécies reativas e remover o calor da reação. Geralmente, quando o iniciador é eficaz para um processo de polimerização específico, a concentração máxima não deve exceder o 2% em relação à concentração da massa dos monômeros.

Tabela 2-4. Porcentagem de conversão do poli(St-co-MMA-co-BuA) em função da concentração do iniciador.

[I] ₀ M	Kap (s ⁻¹) (x10 ⁻⁴)	Correlação linear (R ²)	t 80% conversão (min)
0,037	1,44	0,981	459,8
0,074	1,89	0,958	360,4
0,149	2,58	0,993	241,4

Fonte: Própria

A temperatura durante o processo de polimerização afeta a constante de dissociação e, por conseguinte, o tempo de reação. A fim de conhecer a taxa de reação do poli(St-co-MMA-co-BuA), foram realizadas análises por dilatometria de uma mistura de monômeros 5,05M e peróxido de benzoilo 0,037M, mantendo temperaturas de 40°C e 50°C. Os resultados apresentados na Tabela 2-5 indicam uma diferença altamente significativa entre o tempo projetado a 60°C em comparação com as outras temperaturas. Tal fato já era previsível, tendo em conta a energia de dissociação de peróxido de benzoilo, e a sua meia vida em monômeros, tais como estireno. No entanto, neste trabalho cujo objetivo foi a impregnação com polímeros no interior de amostras de bambu, a temperatura de polimerização deve se manter abaixo de 60°C para evitar os efeitos diretos sobre o seu desempenho mecânico (AIS, 2010).

Tabela 2-5. Porcentagem de conversão do poli(St-co-MMA-co-BuA) em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Kap (s ⁻¹) (x10 ⁻⁴)	Correlação linear (r ²)	t 80% conversão (min)
60	1,44	0,981	459,8
50	0,850	0,999	15686,3
40	0,496	0,999	26881,7

Fonte: própria

A estrutura dos copolímeros, no sentido das sequências dos monômeros na cadeia polimérica não faz parte deste estudo; no entanto, apenas para ilustrar a discussão dos resultados se apresentam alguns dados relatados na literatura. Brar e Satyanarayana (1992) determinaram que na estrutura do poli(St-co-BuA) existem várias sequências de monômeros, as quais dependem das concentrações dos monômeros e das constantes de reatividade.

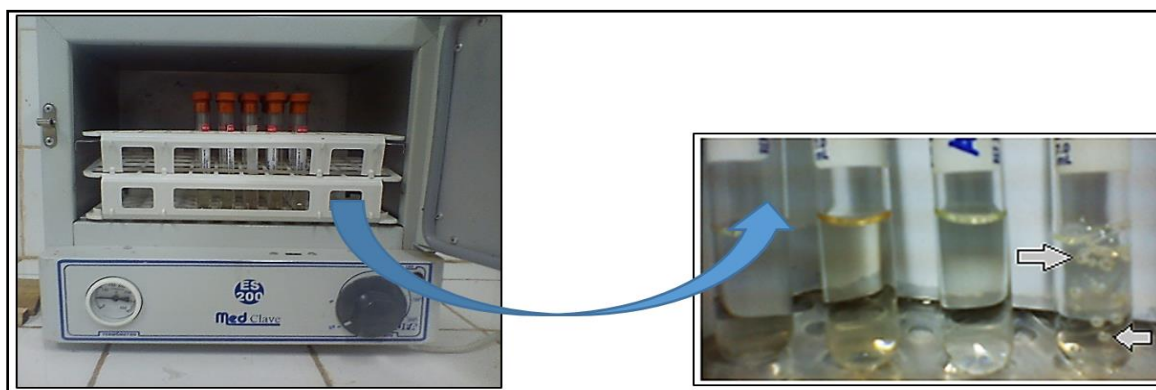
Em baixas concentrações do BuA, as sequências mais prováveis são SSS e SBS. Enquanto o sistema St e MMA a 60°C exibiu uma cadeia de estrutura alternante (Kricheldorf *et al.*, 2004), e o sistema formado pela mistura de monômeros de BuA e de MMA exibiu cadeias poliméricas formadas de blocos de monômeros de estireno alternados com os de acrilato de butila, onde a adição desse último além reduziu a taxa de conversão do copolímero em relação à taxa relatada para o polimetacrilato de metila (Leskovac *et al.*, 1999). A partir do considerado anteriormente, infere-se que a estrutura da cadeia principal do SM compreende blocos de poliestireno e de polimetacrilato de metila alternados, e que a cadeia de SMB está formada por blocos de poliestireno e de polimetacrilato de metila alternados com monômeros de acrilato de butila.

Em geral, a análise por dilatométrica permitiu comparar o avanço da polimerização nos diferentes homopolímeros e copolímeros, como uma base para a projeção do tempo da reação. No entanto, nota-se que a utilização do tolueno como solvente no sistema de polimerização foi apenas para evitar o entupimento do tubo capilar, ou seja, na produção do copolímero para os fins desta pesquisa, a polimerização foi conduzida sem solvente.

2.3.1.2. Grau de avanço da reação e o efeito gel Trommsdorff - Norrish

A polimerização da maioria dos monômeros acrílicos e vinílicos apresenta um remarcado desvio da cinética de reação de primeira ordem, que rege o processo em conversões baixas (Kumar e Gupta, 2003). Durante a polimerização do poliestireno e especialmente do polimetacrilato de metila, com o grau de avanço de reação superior a 25%, observou-se "autoaceleração", como mostrado na Figura 2-11. O sistema apresentou um sobreaquecimento, com produção de bolhas internas e que instantaneamente terminava na solidificação do polímero. Este evento chamado de efeito de gel Trommsdorff-Norrish ocorre devido ao desequilíbrio entre a taxa de terminação e a taxa de início da reação (Billmeyer, 1984); por isso, é necessário manter um controle cuidadoso sobre o progresso da reação, já que como foi mencionado, não foram utilizados solventes durante a polimerização.

Figura 2-11. Efeito gel observado nas amostras durante a polimerização do poliestireno.

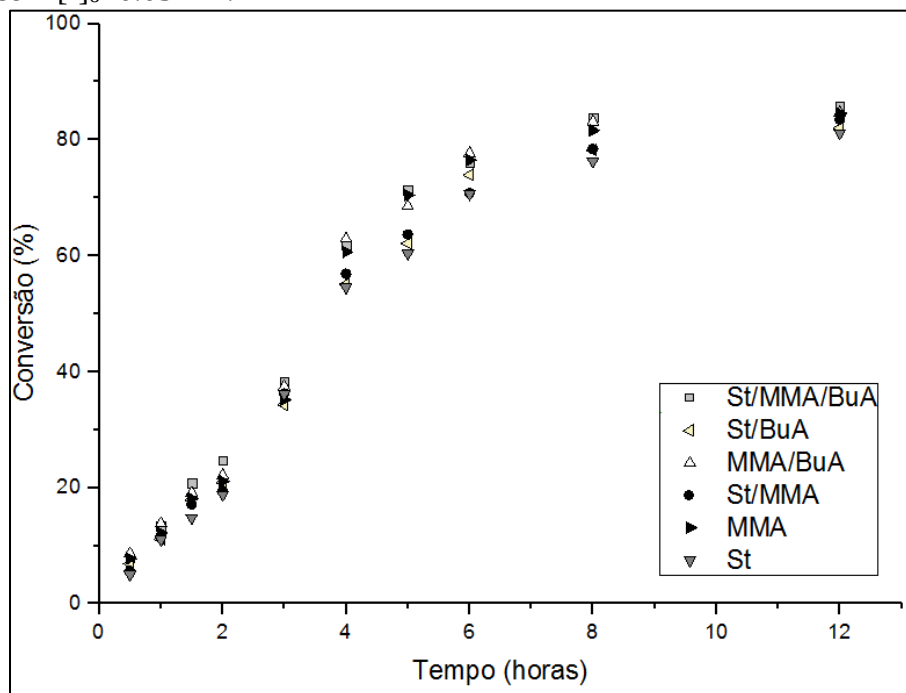


Fonte: própria

Em geral, todas as misturas polimerizadas mostraram autoaceleração em algumas das repetições. Identificou-se que o tempo necessário para aparecer o efeito gel está associado com a natureza do monômero, à temperatura e ao avanço da reação. Por exemplo, as reações de polimerização utilizando estireno e metacrilato de metila com 1,0% de peróxido de benzoilo e 60°C, mostraram o efeito, após 2 h de reação, enquanto que as misturas dos monômeros, binárias e ternárias, para a produção dos copolímeros, apresentaram bolhas antes das primeiras 2 h de polimerização, tempo necessário para que as polimerizações atingiram 25% do avanço da reação.

O avanço da polimerização dos diferentes polímeros e copolímeros, expressada como a porcentagem de sólidos em função do tempo, é mostrado na Figura 2-12. A precipitação dos monômeros em polimerização em massa se realizou com metanol a 4°C, e mantendo as amostras sob controle térmico para evitar a autoaceleração. Os sistemas de homopolímeros que foram adicionados com monômeros de acrilato de butila mostraram maior avanço da polimerização em menor tempo, o que coincide com os resultados já apresentados no item da análise por dilatometria que se mostram de acordo com Beauchemin e Dubé (1999), que relataram o aumento da porcentagem de conversão quando se adiciona acrilato de butila nas polimerizações.

Figura 2-12. Porcentagens de conversão obtidas para diferentes sistemas em polimerização a 60°C e com $[I]_0=0.037$ M.



Tendo-se que St=estireno, MMA=Metacrilato de metila e BuA=Acrilato de butila.-Fonte própria

O grau de avanço da polimerização mostrou que, antes das duas primeiras h da polimerização, todas as amostras contendo acrilato de butila atingiram conversões superiores a 20%. Os monômeros e as respectivas misturas de estireno e de metacrilato de metila apresentaram tendências diferentes quanto à conversão em função do tempo. Após de 4 h de reação se observou maior dispersão dos resultados, até se equilibrar a variação após às 12 h, quando se atingiu 80% do avanço da reação.

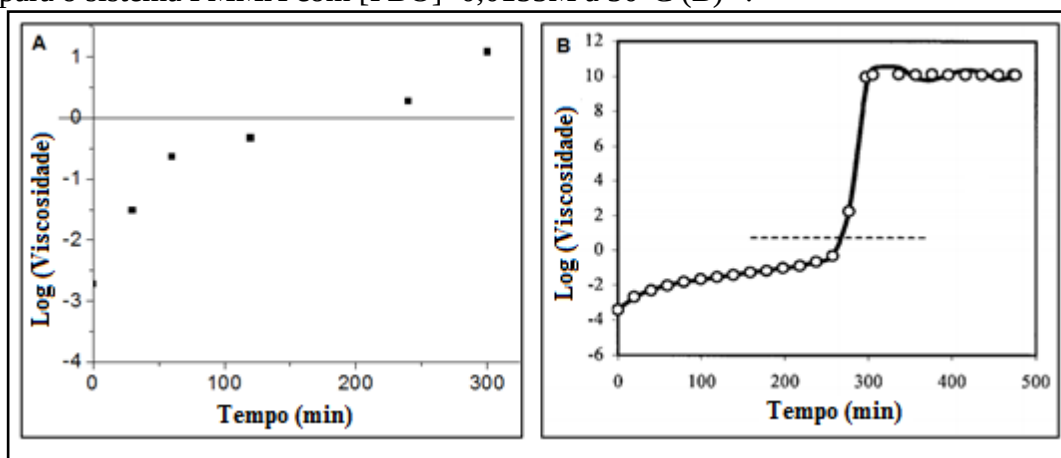
2.3.1.3. Viscosimetria

A determinação do valor da viscosidade das misturas de monômeros, durante o processo de polimerização, permitiu obter-se uma referência da capacidade de infiltração das misturas no bambu. As infiltrações sob pressão, adaptando o método Boucherie, permitem infiltrações de substâncias com viscosidade entre 0,5 Pa.s e 26 Pa.s, no interior dos colmos do bambu *B. vulgaris* (Sobrinho *et al.*, 2012). Então, com o objetivo de conseguir a infiltração dos monômeros no bambu, foram medidas as viscosidades das amostras de polimetacrilato de metila (PMMA) e dos copolímeros, SM e SMB, tomadas a partir dos monômeros ativados

com 1,0% de PBO, polimerizados a 60°C, em diferentes tempos de reação: 30, 60, 120 e 240 min, ou seja, em diferentes porcentagens de avanço da reação.

O reômetro de cone e placa AR2000 aplicado em reações de polimerização, geralmente tem maior aplicação em amostras diluídas (Schweizer, 2004), isto é, onde o comportamento das amostras tende a ser newtoniano. Por essa razão, como padrão de referência da técnica se utilizou o PMMA, por ter esse sistema valores relatados em literatura, o que permite a comparação com os resultados obtidos experimentalmente, e dessa maneira, realizar uma avaliação indireta do método implementado para realizar as medidas da viscosidade nas misturas dos monômeros dos copolímeros SM e SMB utilizados nesta pesquisa. Na Figura 2-13A apresenta-se o gráfico do Log (viscosidade) das amostras de PMMA tomadas em função do tempo de polimerização, acompanhada por um gráfico simulado (Fig. 2-13B) com condições de reação semelhantes (Curteanu *et al.*, 2004). Conforme mostrado, ocorre um pequeno deslocamento entre os resultados, mas a diferença não é considerada significativa; por conseguinte, desta maneira, avaliou-se a implementação da técnica na medida dos outros sistemas de polimerização.

Figura 2-13. Gráfico experimental PMMA com $[PBO]=0,037M$ (A)*, e Gráfico simulado para o sistema PMMA com $[PBO]=0,0155M$ a 50°C (B)**.



* Fonte Própria. **Fonte:Curteanu *et al.* (2004)

Durante o processo de polimerização, a densidade e a viscosidade aumentaram como resultado da formação do polímero. Na prática experimental deste trabalho, a conversão do polímero, medida a partir de precipitações com metanol resfriado, mostrou que com cerca de 40% de conversão, a viscosidade tornava-se tão alta que não foi possível retirar mais amostras

para precipitar os sólidos em conversões maiores. Também se obteve a partir dos resultados da Tabela 2-6, que o uso de acrilato de butila diminui a viscosidade do copolímero SMB, e que uma conversão de 20% nas misturas polimerizadas ainda apresenta a fluidez adequada para permitir a impregnação das amostras de bambu. No entanto, se faz necessário realizar um teste de capilaridade nos corpos de prova para verificar a infiltração das mesclas polimerizadas.

Tabela 2-6. Valores de densidade e da viscosidade em relação à conversão durante a polimerização.

Sistema*	Tempo (min)	Conversão (%)	Densidade (g/mL)	Viscosidade (Pa.s)	Log(Viscosidade)
MMA	0	0	0,8553 ±0,0026	1,90E-03±2,53 E-04	-2,72
	30	7,76	0,8896 ±0,0012	3,044E-02 ±3,14 E-03	-1,52
	60	12,20	1,0079 ±0,0872	2,34E-01 ±1,33E-02	-0,63
	120	21,09	1,0197 ±0,0798	4,65E-1 ±1,287E-02	-0,33
	240	63,67	-----	1,87 ±0,38	0,27
	300	76,45		12,52 ±1,24	1,10
SM	0	0	0,8745 ±0,0031	1,78E-03±3,56 E-04	-2,75
	30	5,59	0,9214 ±0,0268	1,24E-02±4,24 E-03	-1,91
	60	11,66	1,0156 ±0,0785	2,78E-01 ±8,82E-02	-0,56
	120	19,5	1,0322 ±0,0012	3,03E-01 ±3,72E-02	-0,52
	240	59,86	-----	2,42 ±0,18	0,38
	300	70,63	-----	17,50 ±2,05	1,24
SMB	0	0	0,8347 ±0,0032	1,56E-03±4,15 E-04	-2,81
	30	7,86	0,9033 ±0,0395	1,11E-02 ±1,76E-03	-1,95
	60	13,4	1,0067 ±0,0785	3,03E-01 ±3,25E-02	-0,52
	120	24,74	1,0129 ±0,0012	3,42E-01 ±3,28E-02	-0,46
	240	61,83	-----	3,58 ±0,22	0,55
	300	73,29	-----	10,12 ±2,28	0,96

* Os nomes dos copolímeros foram simplificados, tendo em conta que St:Estireno, MMA:Metacrilato de metila, B:Acrilato de butila.- Fonte: Própria

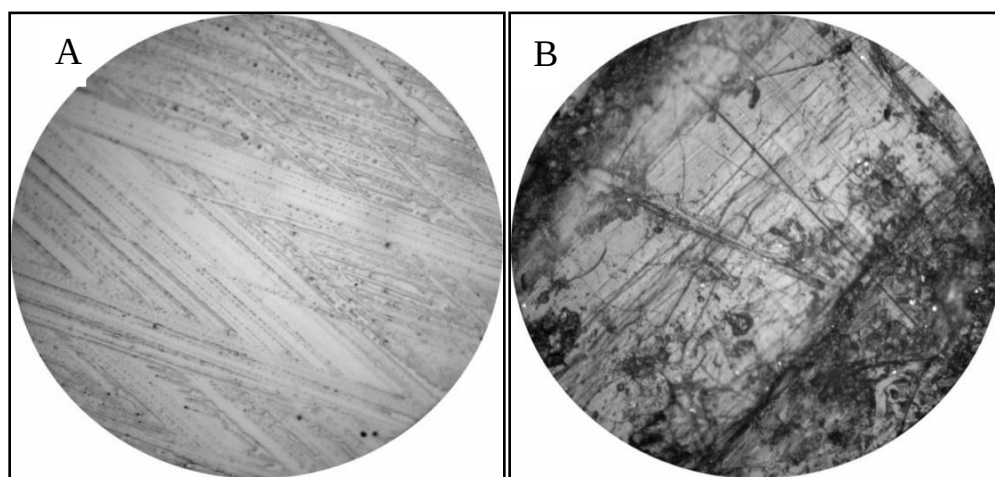
2.3.2. Caracterização dos polímeros

O copolímero poli(St-co-MMA) indicado como SM e o terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA), inidcado como SMB, foram caracterizados mediante diferentes técnicas, a fim de se obter um parâmetro que permita a identificação da impregnação do material polimérico no interior do bambu, como será abordado no capítulo 3 deste trabalho.

2.3.2.1. Microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (SEM)

A morfologia dos polímeros foi inicialmente observada por microscópio óptico de alta resolução com ampliação de 20x. Na Figura 2-14 se apresentam as microfotografias do SM, podendo-se observar que as imagens exibem estrias, provavelmente formadas durante o processo de lixamento. Ao lado, a microfotografia do SMB apresenta algumas microesferas distribuídas na superfície da amostra, sendo essa característica devida possivelmente à adição do acrilato de butila na mistura do SM, o que, em parte, explica sua ação como um agente plastificante na mistura.

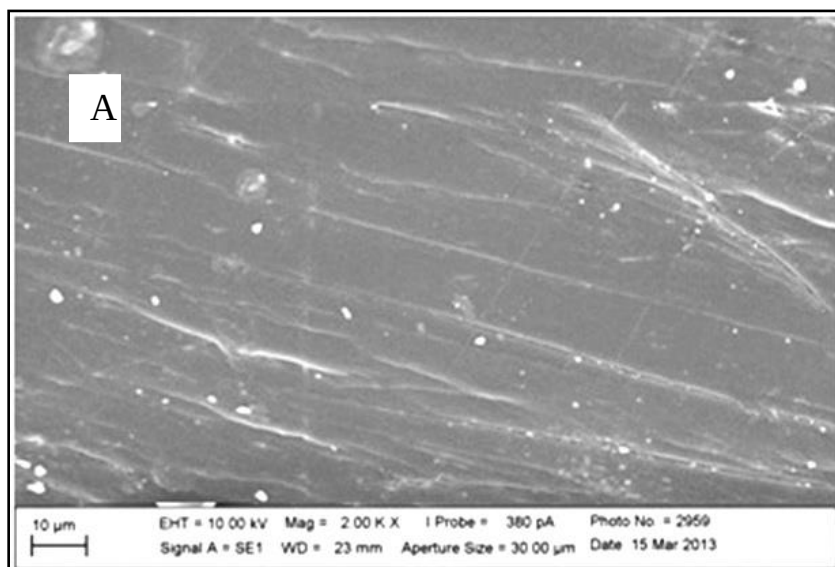
Figura 2-14. Microfotografias do copolímero SM e terpolímero SMB com aumento de 20X.



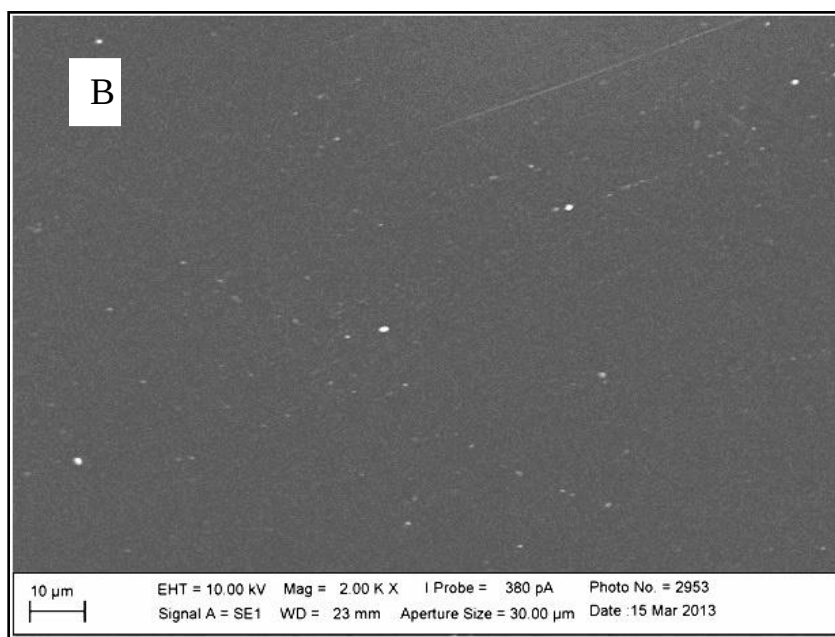
Fonte: Própria

A morfologia dos homopolímeros poliestireno (A) e polimetacrilato de metila (B) foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura com ampliação de 2000X. Na Figura 2-15 pode-se observar que as superfícies das amostras são ligeiramente estriadas, característica também detectada por Mathur e Sharma (2013).

Figura 2-15. Microfotografias obtidas por SEM sobre os polímeros e copolímeros.



Fonte: Própria

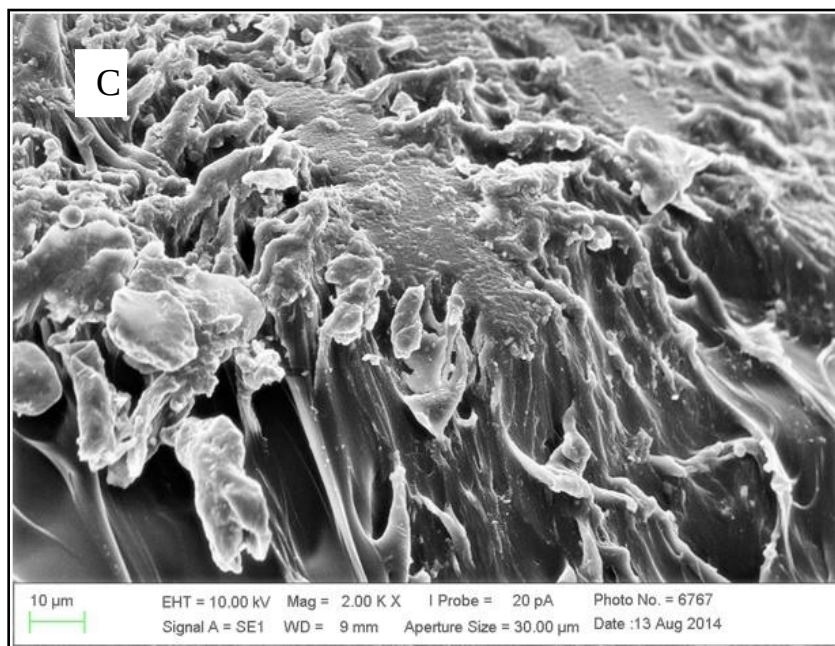


Fonte: Própria

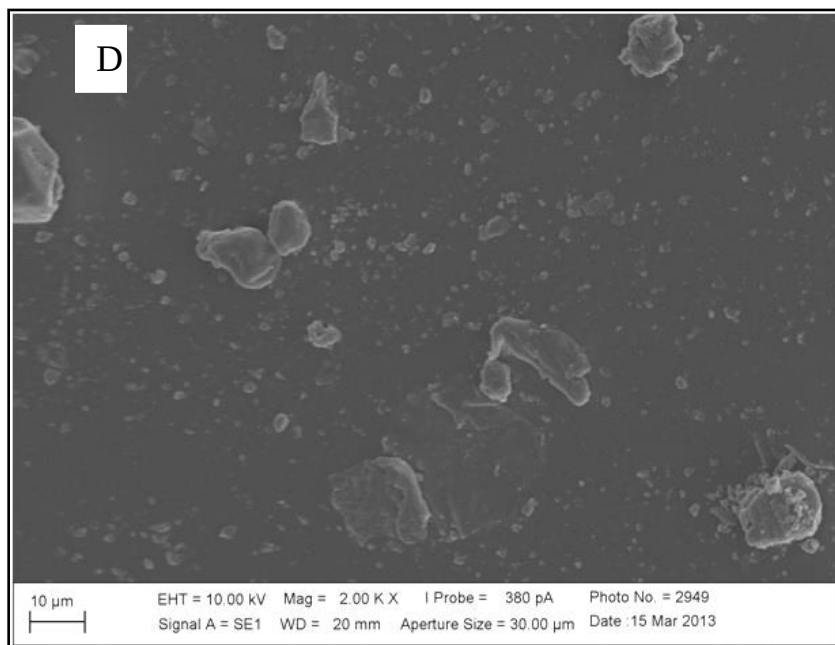
A microfotografia do SM (C), visualizada na Figura 2-15, tomada sobre uma amostra fraturada criogenicamente usando nitrogênio líquido, apresenta uma superfície rugosa, com algumas deformações. No entanto, a microfotografia do SMB exibe algumas áreas com altas

concentrações de bolhas, devido à presença do acrilato de butila, como foi destacado por Ibrahim e Kadum (2012) para as blendas de poli(estireno-co-butadieno-co-estireno).

Figura 2-15. Microfotografias obtidas por MEV sobre os polímeros e copolímeros (continuação).



Fonte: Própria



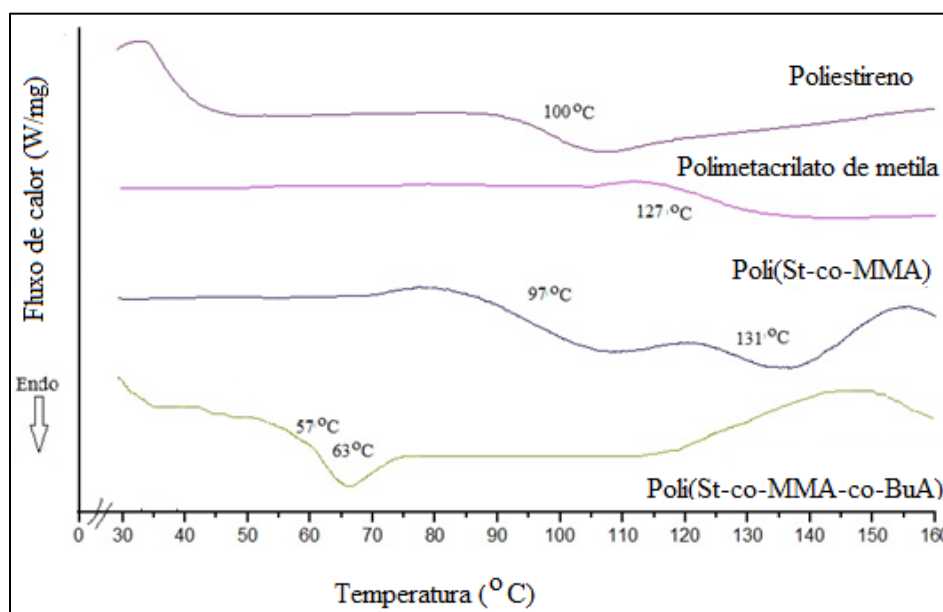
Fonte: Própria

2.3.2.2. Calorimetria de varredura diferencial (DSC)

Os polímeros com propriedades termoplásticas podem ser caracterizados a partir da temperatura de transição vítrea (T_g); por essa razão, os homopolímeros e copolímeros produzidos neste trabalho foram analisados por calorimetria de varredura diferencial (DSC). As curvas calorimétricas do poliestireno e do polimetacrilato de metila (Fig. 2-16) exibiram um único pico endotérmico, entre 100°C e 127°C. Os mesmos polímeros, Pst e PMMA, obtidos em similares condições experimentais, apresentaram valores de T_g em 102°C e 121°C, respectivamente (Morais *et al.*, 2006).

As curvas calorimétricas (Fig.2-16) próprias do copolímero SM apresentaram duas bandas endotérmicas, em valores próximos aos da temperatura de transição vítrea do PSt e do PMMA, o que indica que a estrutura do copolímero é constituída de cadeias alternadas dos homopolímeros. O terpolímero mostrou um comportamento diferenciado em relação ao SM, devido à adição do acrilato de butila e a T_g foi deslocada para valores próximos a 60°C. Um comportamento similar apresentou a adição de 20% de acrilato de butila no polimetacrilato de metila, diminuindo a T_g do polímero para valores entre 57°C e 68°C (Fernández García *et al.*, 1999).

Figura 2-16. Termogramas obtidos por DSC sobre os polímeros e copolímeros.



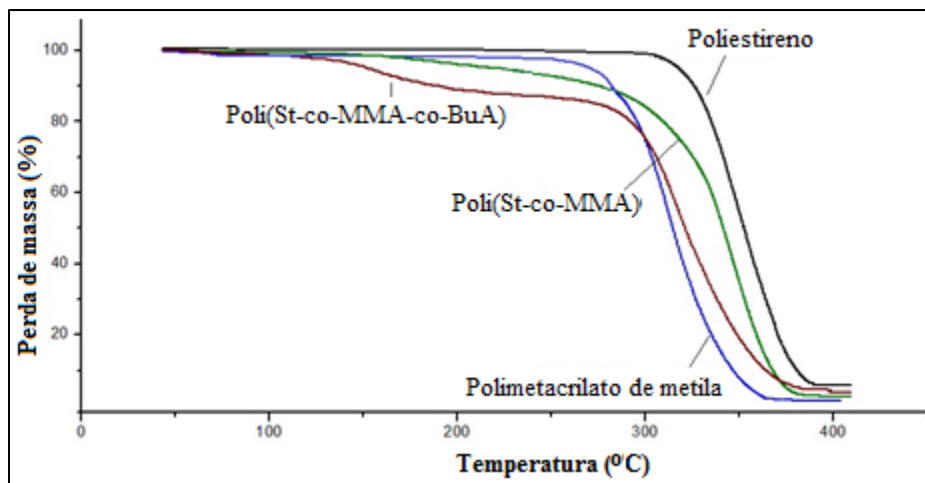
Fonte: Própria

2.3.2.3. Análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTGA)

A alteração na massa dos polímeros em função da temperatura, em atmosfera inerte, se apresenta nos termogramas da Figura 2-17. O PSt exibiu uma perda de massa de 10% a 320°C e a decomposição final foi atingida a 374°C, deixando um resíduo de 5,0%, enquanto que esses mesmos parâmetros para o PMMA foram observados a 272°C e 389°C, respectivamente, sem deixar resíduos.

O copolímero SM apresentou uma decomposição em duas fases intermediárias entre os termogramas obtidos para os homopolímeros, como também foi relatado por Kaniappan *et al.* (2011), enquanto que o terpolímero SMB mostrou duas fases distintas de decomposição, encontrando-se uma dessas fases por fora da gama dos homopolímeros (Fig. 2-17). No SM, a perda de massa de 10% ocorreu a 276°C e a degradação final a 389°C com 3,0% de resíduo, enquanto que a perda de 10% da massa no SMB se evidenciou em 191°C e a final a 391°C, com resíduo de 5,1%. Resultados semelhantes foram relatados por Leskovac *et al.* (1999), que em seus estudos com misturas de monômeros de acrilato de butila e estireno, e mesclas de acrilato de butila e metacrilato de metila, indicaram a diminuição das temperaturas de decomposição com o aumento do acrilato de butila. Kaniappan *et al.* (2011), em seu trabalho sobre metacrilato-estireno metila, que mostraram como se segue as mesmas etapas de homopolímeros de decomposição.

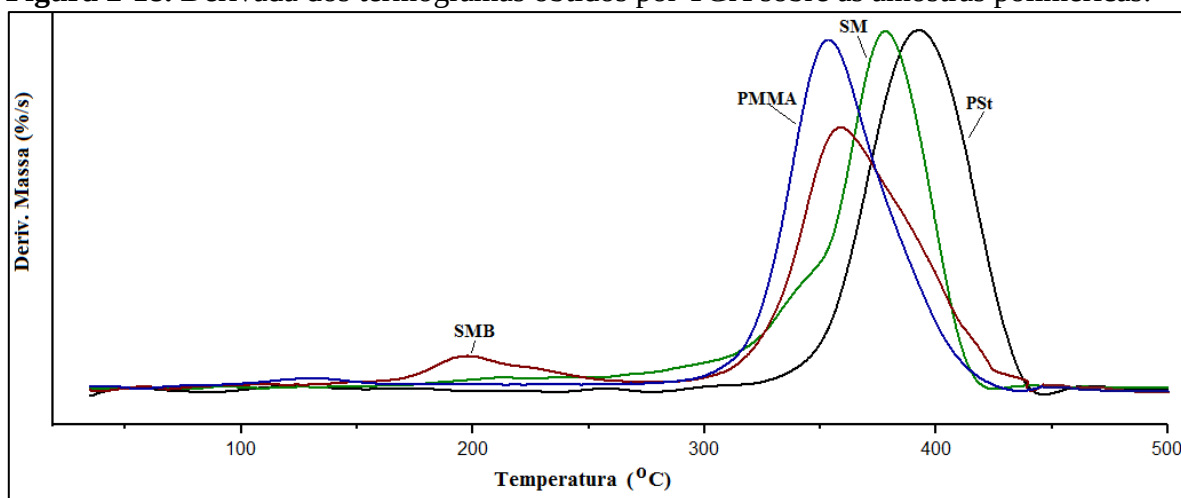
Figura 2-17. Termograma obtido por TGA a partir das amostras dos polímeros



Fonte: Própria

A derivada de cada termograma obtido para cada um dos polímeros é apresentada na Figura 2-18. Nos gráficos se percebe que os processos de perda de massa relacionados com a degradação do polímero ocorrem em fases específicas, e com temperaturas definidas. Nota-se que o PSt é degradado em uma única etapa em 392°C, enquanto que o PMMA é degradado em 353°C. O copolímero SM apresentou uma fase de decomposição em 378°C com um pequeno ombro em 337°C, indicando uma mudança na degradação em relação aos homopolímeros. O terpolímero SMB exibiu duas etapas de reação claramente definidas em 201°C e em 359°C.

Figura 2-18. Derivada dos termogramas obtidos por TGA sobre as amostras poliméricas.

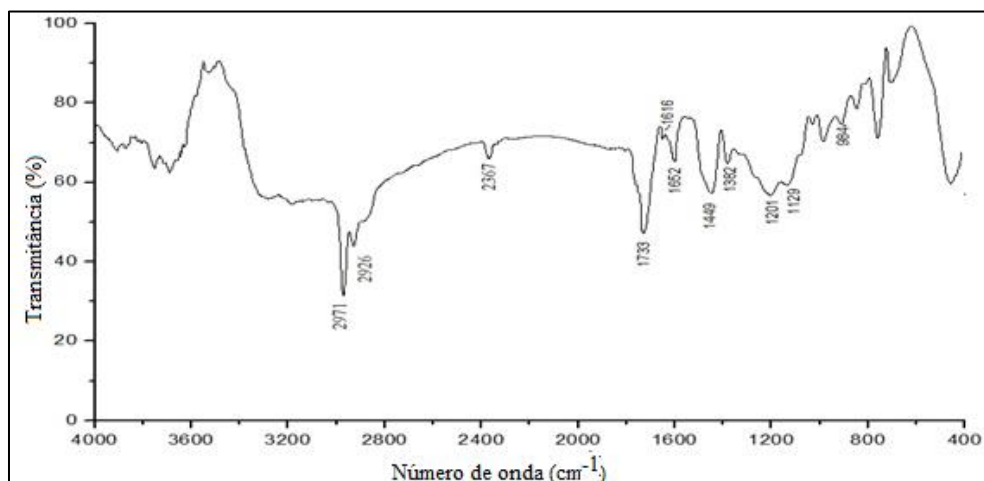


Fonte: Própria

2.3.2.4. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A caracterização por meio de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) permitiu a identificação dos grupos funcionais presentes nos polímeros tendo como referência os espectros referidos na literatura (Kwon, 1998), para cada um dos homopolímeros. No espectro apresentado na Figura 2-19 pode-se identificar as bandas típicas do poliacrilato de butila obtido experimentalmente. O pico em 1733 cm^{-1} , atribuído ao estiramento do grupo carbonila (C=O), e em 1201 cm^{-1} devido, ao estiramento do grupo C-O.

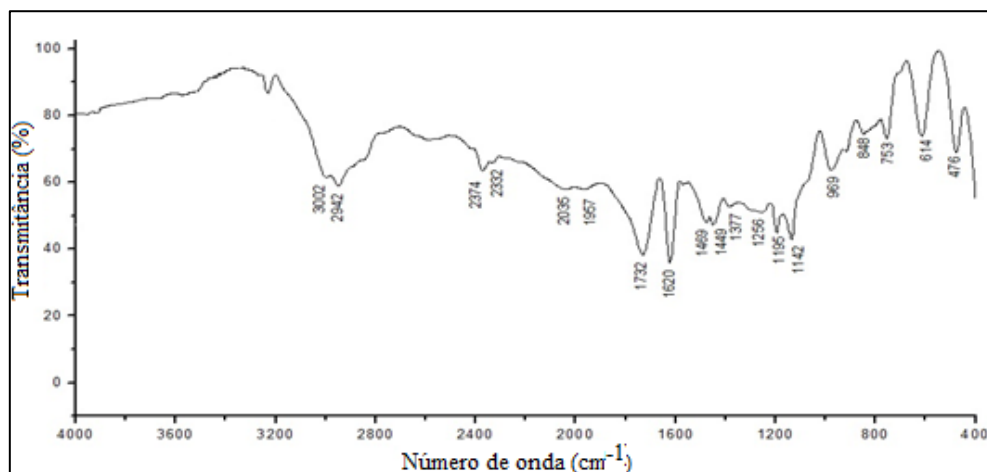
Figura 2-19. Espectro no infravermelho do poliacrilato de butila (PBUA).



Fonte: Própria

O espectro do PMMA apresentado na Figura 2-20 exibe as bandas de absorção em 3002 cm^{-1} e em 2942 cm^{-1} , devidas ao alongamento assimétrico das ligações do grupo metila ($-\text{CH}_3$), e o alongamento do grupo carboxilo ($\text{C}=\text{O}$) em 1732 cm^{-1} . Além disso, apresenta bandas em 1469 cm^{-1} e em 1449 cm^{-1} atribuídas às deformações do tipo tesoura do grupo metileno ($-\text{CH}_2$) e às deformações assimétricas devidas ao estiramento do grupo metila ($-\text{CH}_3$), respectivamente. O pico característico em 1377 cm^{-1} é devido à deformação do grupo metoxilo ($-\text{OCH}_3$), e as bandas correspondentes ao estiramento de ligações dos grupos $\text{C}-\text{O}$ e $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ em 1142 cm^{-1} e 1195 cm^{-1} , respectivamente.

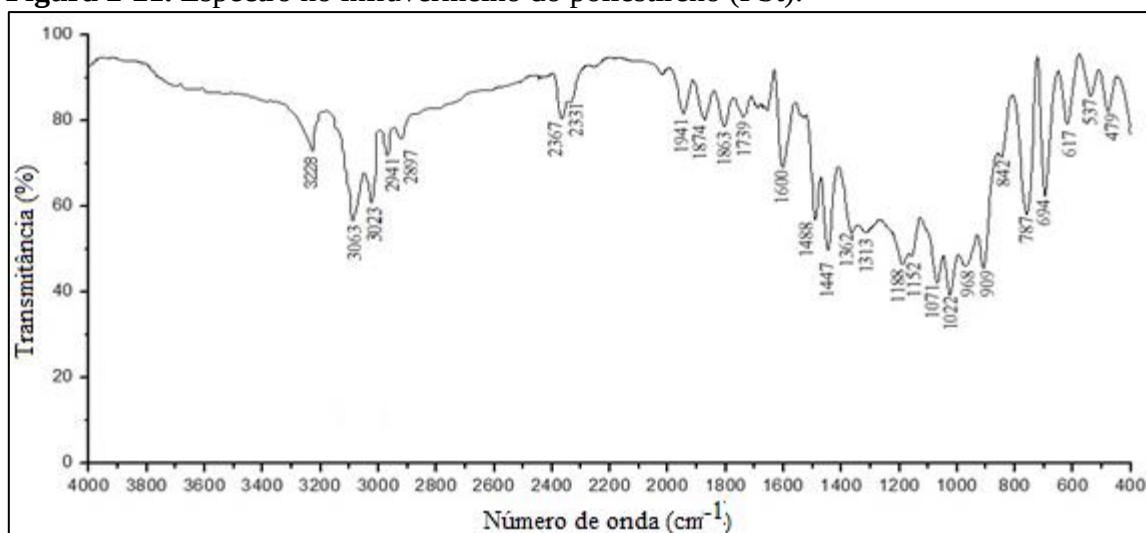
Figura 2-20. Espectro no infravermelho do polimetacrilato de metila (PMMA).



Fonte: Própria.

O espectro do poliestireno na região do infravermelho é apresentado na Figura 2-21. O espectrograma apresenta bandas de absorção em 3026 cm^{-1} e 2949 cm^{-1} atribuídas ao estiramento do grupo (-C-H) dos grupos aromáticos e alifáticos, respectivamente. Os picos em 1600 cm^{-1} , 1488 cm^{-1} e 1447 cm^{-1} são atribuídos ao estiramento do grupo C=C aromático. O pico devido à deformação do grupo C-H dos hidrogênios do anel de benzeno (5 hidrogênios adjacentes) aparece em 787 cm^{-1} e a deformação própria da vibração do anel de benzeno se encontrou em 694 cm^{-1} . Por sua vez, o alongamento dos átomos de hidrogênio no anel benzênico foi observado em 3063 cm^{-1} e 3023 cm^{-1} .

Figura 2-21. Espectro no infravermelho do poliestireno (PSt).



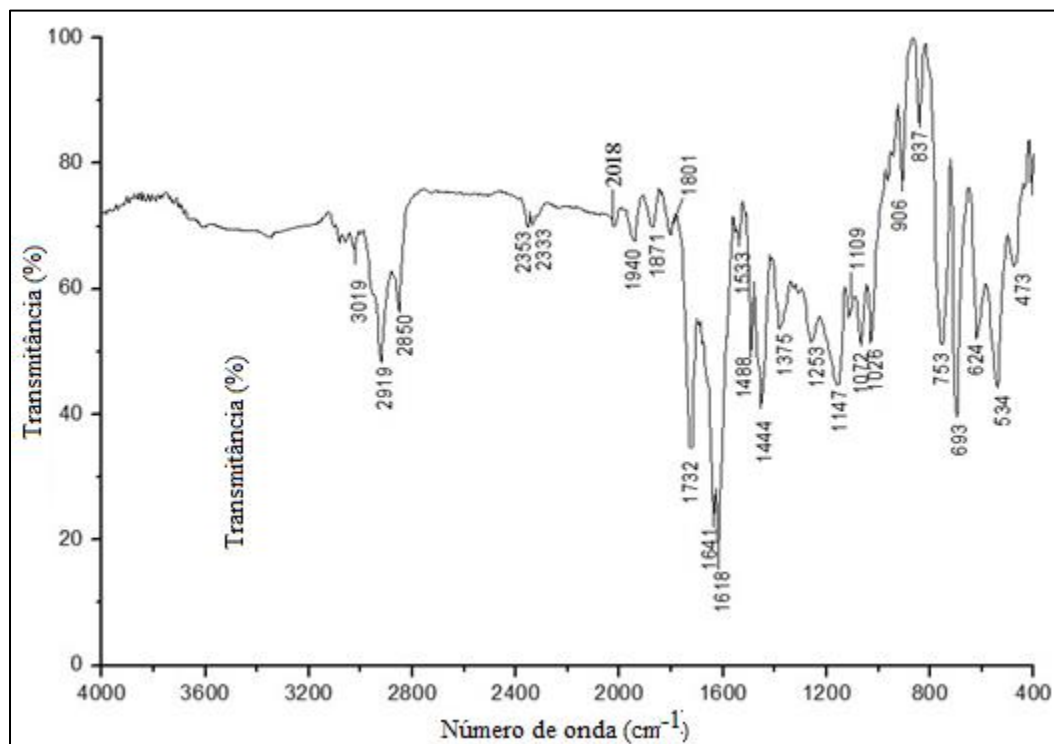
Fonte:Própria

O espectro do copolímero poli(St-co-MMA) no infravermelho é mostrado na Figura 2-22. No espectrograma se evidenciam picos devido ao estiramento dos grupos C=O e -OCH₃, próprios do PMMA em 1732 cm^{-1} e em 1147 cm^{-1} , respectivamente. Também se observam, picos em 1618 cm^{-1} , 1641 cm^{-1} , 693 cm^{-1} e 753 cm^{-1} devidos ao estiramento do grupo C=C do anel de benzeno próprio do poliestireno.

O terpolímero poli-(St-co-MMA-co-BuA) apresentou, em geral, os mesmos picos do espectrograma do SM, exceto por pequenos deslocamentos devidos à presença do acrilato de butila (Fig. 2-23). Os picos atribuídos aos acrilatos podem aparecer duplicados, como exemplo, percebe-se a deformação por alongamento do grupo C=O nos picos em 1735 cm^{-1} e 1722 cm^{-1} , quando geralmente é caracterizado por apresentar um único pico bem definido. Também, o espectro do SMB revelou o aparecimento de uma banda que impede a localização

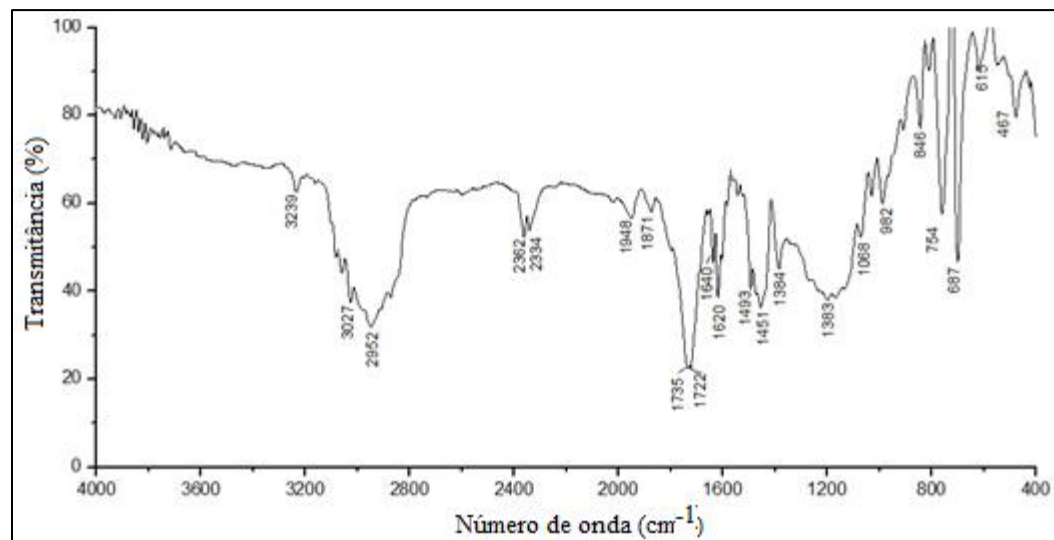
dos picos em certas regiões, como acontece com a banda em 1383 cm^{-1} que mascara os picos devidos à deformação por estiramento do grupo $-\text{OCH}_3$.

Figura 2-22. Espectro no infravermelho do copolímero poli(St-co-MMA).



Fonte:Própria

Figura 2-23. Espectro no infravermelho do terpolímero poli(St-co-MMA-co-BuA).



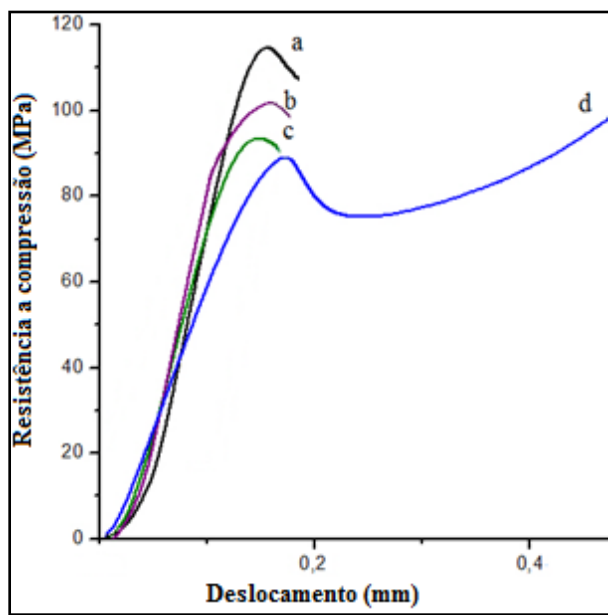
Fonte:Própria

2.3.2.5. Ensaio de compressão dos corpos de prova dos polímeros

O gráfico de tensão versus deformação, apresentado na Figura 2-24, exibe os dados obtidos no ensaio de compressão em amostras dos homopolímeros e copolímeros obtidos experimentalmente. Antes do ensaio, os corpos de prova foram aquecidos a 40°C para eliminar a memória térmica das amostras poliméricas. O comportamento frágil de homopolímeros e do copolímero SM difere do comportamento plástico do terpolímero SMB.

Os polímeros amorfos, tais como o PMMA e o PSt, geralmente são misturados com plastificantes para diminuir a Tg e para melhorar as propriedades mecânicas de resistência ao impacto, à tração e à compressão (Lapman S., 2003). Por exemplo, a adição do acrilato de etilo na polimerização de metacrilato de metila aumentou a resistência à flexão do homopolímero (Anusavice, 2004). O efeito plastificante do BuA, em estudo nesta tese, já tinha sido relatado por Gebizlioghu *et al.* (1990), a partir de ensaios de fluência sobre blendas produzidas com polímeros amorfos. O acrilato de butila adicionado às amostras de ácido polilático diminuiu a cristalinidade do PLA, obtendo-se como resultado um comportamento dúctil ao diminuir a rigidez da mistura polimérica (Bing Meng *et al.*, 2012).

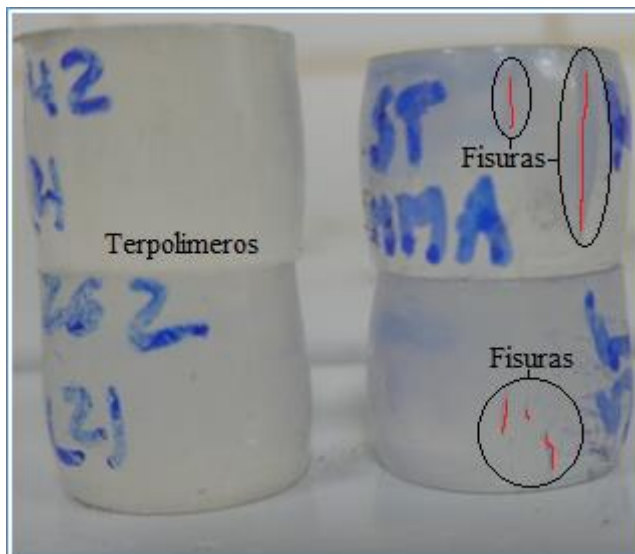
Figura 2-24. Tensão- Deformação das amostras poliméricas durante o ensaio de compressão.



Fonte: Própria. a: PMMA, b: PSt, c: SM e d: SMB

As amostras dos homopolímeros PSt, PMMA e do terpolímero SMB exibiram marcadas diferenças, como pode-se ver na Figura 2-25. O aparecimento de fissuras (marcadas dentro dos círculos) nas amostras de poliestireno, no polimetacrilato de metila e no SM, indicaram que a adição do acrilato de butila no SMB acarretou em um comportamento plástico das amostras.

Figura 2-25. Corpos de prova de copolímeros após o ensaio de compressão axial.



Fonte:Própria

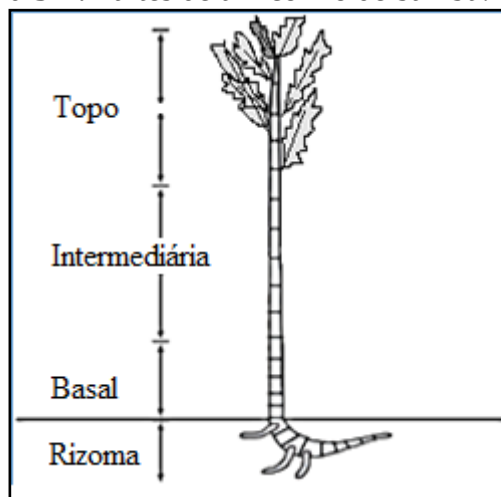
3. IMPREGNAÇÃO DO BAMBU *B. VULGARIS* COM POLÍMEROS

3.1. Generalidades sobre o Bambu

O bambu é uma gramínea gigante de rápido crescimento que está dotada de relevantes propriedades mecânicas que podem ser aproveitadas para sua utilização em artesanato, no campo industrial, na arquitetura e na engenharia. A classificação botânica inclui ao bambu dentro da família *Poaceae* das gramíneas, e de acordo com a mais atualizada categorização taxonômica se tem identificado 116 gêneros diferentes e, aproximadamente, 1500 espécies desse arbusto (Kelchner *et al.*, 2012). O *B. vulgaris* utilizado nesta investigação, foi classificado na subfamília bambusoideae, na tribo Bambuseae no gênero Bambusinae da espécie *B. vulgaris*, cuja distribuição biogeográfica se apresenta na maioria de países do trópico equatorial.

A diferenciação de genótipos do bambu causa a heterogeneidade de tamanhos do colmo, na distribuição das fibras, na morfologia e na composição durante o crescimento do arbusto. O bambu não possui alburno, nem cerne nem câmbio vascular, necessários para o desenvolvimento secundário, como ocorre na madeira. Os colmos são segmentados em nós e o espaço entre dois nós é chamado de entrenó ou internódio. Para fins de estudo e aplicação na arquitetura e em engenharia, comumente, no Brasil, o colmo é dividido em três partes: basal, intermediária e de topo, conforme se apresenta na Figura 3-1.

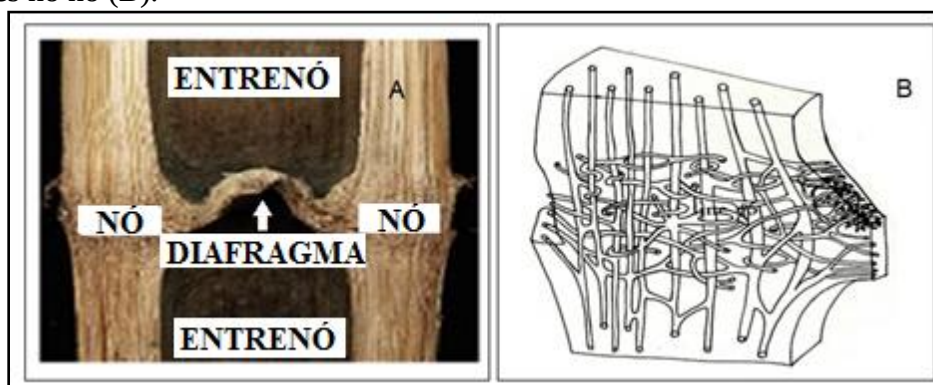
Figura 3-1: Partes de um colmo de bambu.



Fonte: Adaptado de: <http://es.slideshare.net/FerminBlanco/guadua-angustifolia>

O diafragma é um tecido que interconecta transversalmente as células no nó (Fig. 3-2A) deixando um espaço interno entre eles, embora existam espécies denominadas “bambus macho”, ou “bambus cheios” que não apresentam esse espaço (Liese, 2004). Na seção do nó que não pertence ao diafragma (Fig. 3-2B), o feixe vascular básico é composto por xilema, protoxilema e floema circundado por fibras que se desmancham, e em vez disso, evidencia-se uma aglomeração de elementos filiformes que ligam o floema com alguns feixes vasculares oblíquos, assim como feixes que conseguem atravessar o nó (Liese e Ding, 2003). A existência dessas bifurcações e dos elementos individuais distribuídos aleatoriamente sobre o parênquima foram confirmadas por meio de observações topoquímicas (Lybeer *et al.*, 2006).

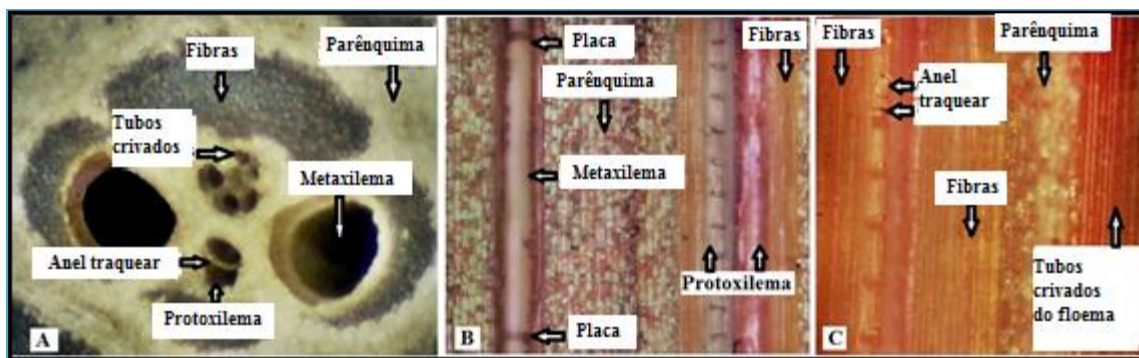
Figura 3-2: Estrutura geral de um colmo de bambu (A). Desenho de elementos dos feixes vasculares no nó (B).



Fonte: Adaptado de Liese, (1998).

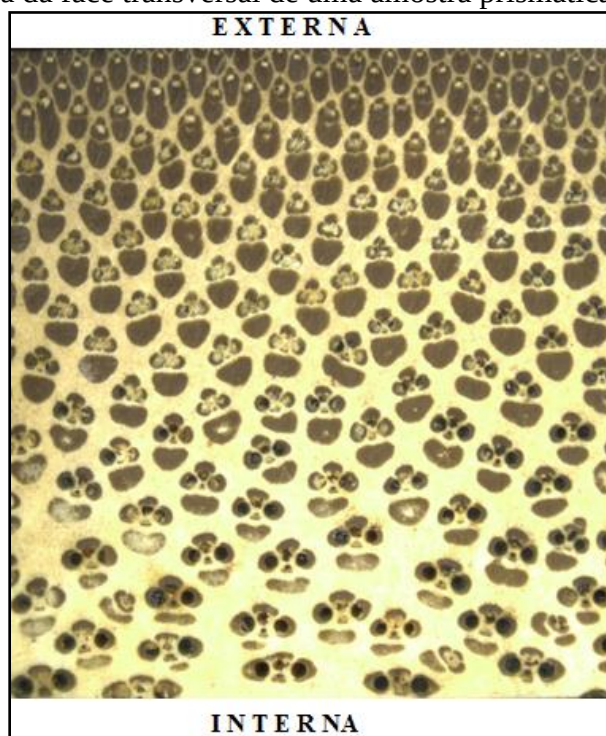
Do ponto de vista anatômico o bambu é composto de três tipos de tecidos fundamentais, o parênquima, o esclerênquima ou fibras, e os feixes vasculares (Fig. 3-3), cada um com funções anatômicas específicas em relação às propriedades físicas, biológicas e mecânicas dos colmos. A distribuição dos feixes vasculares, xilema, protoxilema e floema é mais intensa na parte externa da parede do colmo do que na interna (Fig 3-4).

Figura 3-3: Microfotografias da anatomia do bambu *B. vulgaris*. Corte longitudinal (A). Corte transversal (B, C).



Fonte: Própria

Figura 3-4: Fotografia da face transversal de uma amostra prismática de bambu *B. vulgaris*



Fonte: Própria

O feixe vascular é composto de dois metaxilemas separados por parênquima, os quais apresentam diâmetros entre 35 e 180 μm . Em um corte transversal do colmo, se observa o aumento dos diâmetros desses vasos condutores à medida que diminui a quantidade de fibras (esclerênquima) no sentido da parte externa para a parte interna da parede do colmo.

Longitudinalmente o metaxilema é composto por elementos contínuos de células meristemáticas lignificadas, conectadas axialmente por placas planas perfuradas, ligeiramente oblíquos, que permitem o transporte da água e de sais minerais desde a raiz por meio de transporte passivo, ao gerar-se um gradiente de pressão interno; o líquido é impulsionado pelas forças de adesão e coesão que se apresentam entre as paredes e as moléculas da água. O metaxilema é conectado por aberturas ou *pits* que permitem a difusão entre as células adjacentes. Os elementos condutores representam menos de 8% da seção transversal do colmo, diferentemente de outras plantas madeireiras que alcançam valores entre 30 e 70%, o que permite uma distribuição radial efetiva de substâncias (Liese, 1994).

O protoxilema se encontra entre os dois vasos do metaxilema. Esse conduto está composto de anéis traqueares lignificados conforme aparece nas Figuras 3-2B e 3-2C, sendo conectados às membranas das fibras ou ao tecido parenquimático que lhe circunda dentro da lacuna protoxilemática.

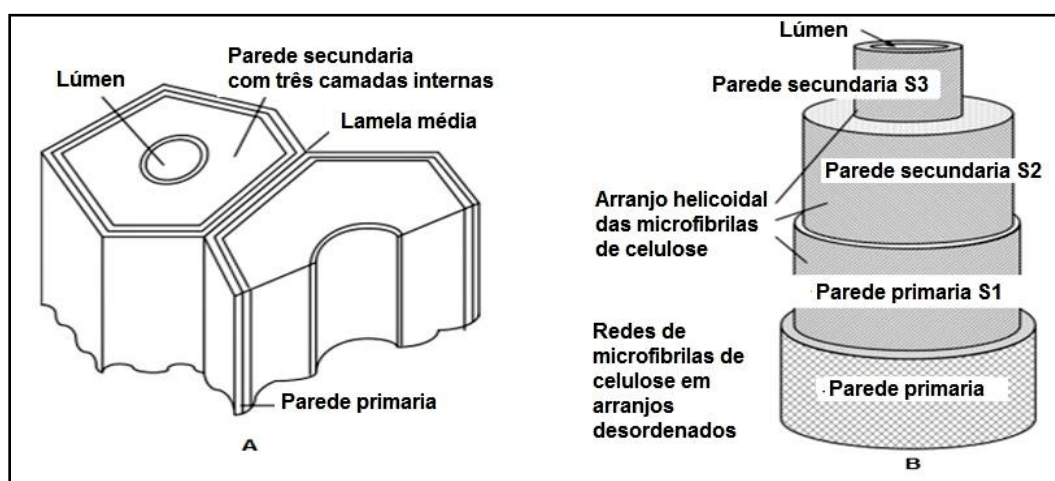
O floema é formado de tubos crivados de paredes finas, deslignificadas, e circundadas de células parenquimáticas que apoiam o processo de transporte de substâncias e fornecem resistência mecânica e sustentação aos condutos. Cada elemento apresenta conexão axial por meio de placas crivadas, dando passo às substâncias axialmente através das placas porosas ao gerar-se um gradiente de pressão adequado para o deslocamento das biomoléculas por meio de transporte passivo ou ativo (Qisheng *et al.*, 2002).

O escasso intercâmbio de fluidos entre o floema e as células adjacentes se realiza através dos “*pits*” que se intercomunicam tangencialmente com as paredes celulares. O gradiente de pressões formado entre as membranas causa a absorção do conteúdo através dos *pits* que estão distribuídos pela parede do tubo de forma aleatória.

Os elementos condutores podem se tornar impermeáveis após a acumulação de substâncias cerosas, ou pela obstrução causada pelas tiloses, cujas protuberâncias impedem a passagem dos fluidos dentro dos condutos geralmente em idades maduras do colmo, o que se presume como uma limitante para o processo de preservação e de impregnação com monômeros utilizados neste trabalho.

As fibras se localizam dentro da matriz parenquimática constituindo o tecido esclerenquimático do colmo, e são relevantes para explicar o comportamento mecânico do bambu (Osorio *et al.*, 2007a). As fibras que acompanham os feixes vasculares e aquelas que estão distribuídas na matriz parenquimática têm uma contribuição de cerca de 50% do tecido, e aproximadamente de 70% da massa do colmo do bambu (Liese, 1998). A fibra alcança uma proporção entre o diâmetro e o comprimento de 1:500, mantendo um lúmen central menor que 4 μm . A estrutura da fibra é polilamelada, apresentando microfibrilas lignificadas dispostas em multicamadas (Fig. 3-5). As direções angulares das microfibrilas que cercam a parede secundária, e o espessamento causado pela lignificação, estão fortemente relacionados com a rigidez e a flexão do colmo, dependendo naturalmente da idade e da espécie do bambu. O conteúdo de hemicelulose permanece constante nas diferentes camadas da parede celular, enquanto que a celulose aumenta regularmente a partir da primeira camada para a segunda, na direção oposta do que ocorre com o teor de lignina.

Figura 3-5: Estrutura da parede da fibra natural do Bambu (A). Detalhes sobre a estrutura da fibra de bambu (B)*.



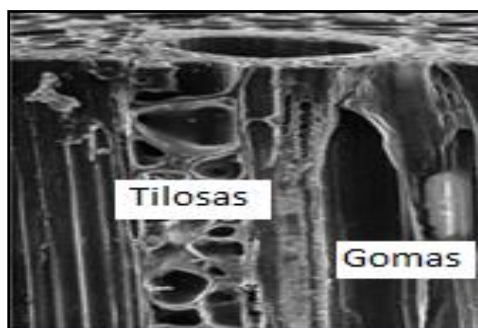
*Fonte: Adaptado de: Liu *et al.* (2012)

Nos entrenós, as fibras servem de sustentação e proteção dos feixes vasculares, embora em algumas espécies apareçam como pacotes isolados, distribuídos ao longo do parênquima. Próximo aos nós as fibras são curtas e aumentam de tamanho para o meio do entrenó (Osorio. *et al.*, 2009). A concentração das fibras aumenta diametralmente da parte interior para o exterior do colmo, no sentido contrário ao conteúdo do parênquima e dos

feixes vasculares, implicando no aumento da densidade nas camadas externas do colmo. Essa mesma característica ocorre no sentido da base para o topo. A distribuição dos feixes de fibras é relevante no comportamento anisotrópico do bambu, uma vez que a resposta aos esforços depende da direção em que é aplicada a carga sobre o feixe de fibras, axial, radial perpendicular ou tangencial perpendicular (Osorio *et al.*, 2007b).

O tecido vascular e as fibras do bambu estão incorporados dentro de uma matriz de parênquima. Esse tecido parenquimático é fundamental para o suporte da planta e não sofre lignificação durante os primeiros três anos, o que resulta nas baixas propriedades mecânicas do colmo verde. O parênquima ocupa aproximadamente 54% da área transversal do colmo, valor dependente da espécie, da posição no colmo e da idade (Liese, 1998). As células do parênquima armazenam o amido necessário para fornecer energia ao bambu. Esse tecido reage ante as incisões, através de um sistema de cicatrização como mecanismo de defesa aos cortes, e o efeito manifesta-se pela formação de tiloses devido à segregação de substâncias nas áreas circundantes aos feixes vasculares (Fig. 3-6), e produzindo escleridas ou gomas, que obstruem os tubos crivados do floema (Liese, 2004).

Figura 3-6: Tiloses gerando o bloqueio nos vasos condutores.



Fonte: Liese (2004).

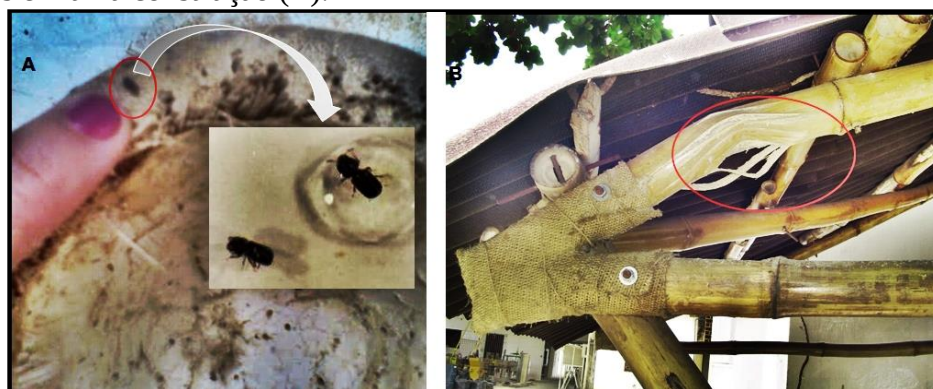
A parte externa do colmo é fundamentalmente aquela que lhe dá sustentação e proteção superficial. A casca que cobre o colmo consiste principalmente de células com paredes celulares espessas impregnadas com suberina e dióxido de silício, componente que fornece a maior contribuição à resistência mecânica do bambu. A camada mais externa da casca é a epiderme, formada por lamelas com paredes celulares que contêm cutina, pectina, cera, polímeros e outros polisacarídeos, que impedem a transpiração e mantêm o equilíbrio de água dentro do colmo, porém permitindo a troca de gases entre o parênquima e o ambiente

através de estômatos distribuídos na superfície. Ao lado da epiderme está a hipoderme, uma camada de fibras que ocupa aproximadamente 5% da área transversal do colmo, funcionando como complemento do sistema termorregulador (Liese W. 1998). Para fins práticos do presente estudo, o bloqueio causado pela hipoderme é um fator limitante para os processos de preservação química.

3.1.1. Processos de preservação do colmo de bambu

As aplicações dos colmos de bambu estão restritas a certas condições de corte associadas ao teor de umidade, concentração de amido, maturidade e estado de nutrição da planta. Em geral, é aconselhável cortar o bambu em tempos de escassas chuvas, antes do nascer do sol e com a lua em mingunte, condições que têm sido relacionadas com a captação de nutrientes e portanto, com a degradação, já que a quantidade de amido armazenado no parênquima é uma das principais fontes de atração de insetos xilófagos e fungos (Liese, 1998). Na Figura 3-7A, apresenta-se a degradação do *B. vulgaris* armazenado no meio ambiente, sem passar por nenhum tratamento de preservação; na Figura 3-7B, pode-se observar o dano causado pelo ataque de insetos sobre um elemento estrutural de bambu desta mesma espécie.

Figura 3-7: Ataque de insetos sobre um nó de *B. vulgaris* (A). Deterioro causado pelo ataque de insetos em uma construção (B).



Fonte: Própria

O bambu é um material vulnerável à degradação por fatores bióticos e abióticos. A durabilidade natural do bambu é baixa e depende da espécie, das condições de cultivo e da

aplicação que terá o colmo (Montoya, 2008). Sob uma cobertura, os colmos de algumas espécies, sem nenhum tipo de tratamento de preservação, podem durar entre 4 e 7 anos. As partes do colmo mais baixas e as camadas mais externas são as mais duráveis, mostrando menor ataque de insetos e menor degradação (Espelho, 2007). Os fatores abióticos que comprometem a durabilidade e o desempenho do bambu estão relacionados com a vulnerabilidade ante as condições atmosféricas, à presença de rachaduras ou fissuras nos colmos, aos danos ocasionados pela secagem e à susceptibilidade à ignição, entre outros.

Antes de realizar qualquer tratamento nos colmos é necessário conhecer as características básicas desejáveis no bambu e sua possível aplicação, uma vez que cada tratamento tem algumas vantagens e desvantagens que afetam o efeito final do material (Gnanaharan, 2000). Existe uma grande variedade de técnicas de preservação que dependem da viabilidade de recursos e das propriedades requeridas aos colmos. Entre os tratamentos de preservação mais empregados na atualidade se encontram: secagem na touceira, imersão em água com derivados de boro, fumigação ou aquecimento, difusão vertical e deslocamento da seiva com e sem pressão (Montoya, 2008).

Os tratamentos preservativos são realizados a fim de reduzir os processos bioquímicos e aumentar assim a vida útil do colmo. As infiltrações comuns sugerem substâncias que modificam o teor de polissacarídeos, e/ou a estrutura celular do bambu. A utilização de agentes bloqueadores de organismos invasores é aceitável se o processo de infiltração for amigável com o meio ambiente (Liese, 1998). Os tratamentos químicos de infiltração devem ser realizados sob pressão, uma vez que a complexa anatomia do tecido permite o fluxo axial das substâncias no entrenó; no entanto, no nó os condutos vasculares enfrentam um desvio que dificulta a transferência do material. Na direção radial, o transporte de material preservativo no parênquima ou nas fibras é ainda mais complexo, devido à limitada difusão das substâncias através de pequenas aberturas ou "*pits*", presentes nas paredes dos feixes vasculares.

A infiltração dos colmos na posição vertical é favorecida pela ação da gravidade. Esse procedimento requer que sejam utilizados colmos sem rachaduras, deixando a seção mais

baixa do colmo para cima, enquanto o vazio internodal é abastecido com uma solução de ácido bórico e bórax em proporção 1:1, em concentrações entre 4 % – 6% durante 14 dias (González, *et al.*, 2009). O deslocamento da seiva ou método Boucherie modificado produz maior eficiência do que o método anterior. Esse procedimento requer de tanques que contenham substâncias preservativas as quais são pressurizadas através de compressores empregando-se entre 0,1 MPa e 0,2 MPa, até permitir a passagem da solução (Fig. 3-8B) por uma grande quantidade de vasos condutores (Liese, 1998). O colmo é infiltrado na mesma direção em que ocorreria o transporte de substâncias naturalmente no bambu (Montoya, 2008).

3.1.2. Composição química do bambu

A madeira e o bambu consistem em substâncias químicas semelhantes o que lhes permitem a sua classificação botânica no grupo das plantas; no entanto, a concentração e a distribuição destas substâncias no interior das suas estruturas biológicas são fatores fundamentais que definem suas propriedades fisiológicas e mecânicas.

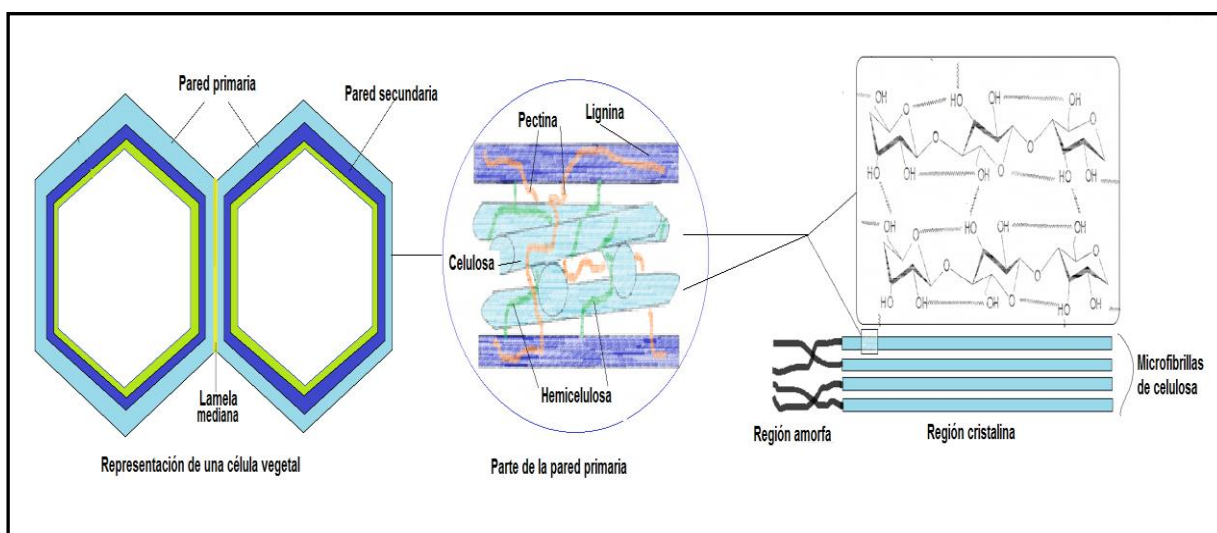
A principal substância que compõe o bambu é a lignocelulose, nome dado para um conjunto de três componentes, o polímero natural lignina e os polissacarídeos celulose e hemicelulose. Os colmos de bambu contêm aproximadamente 50% de celulose, 20% de hemicelulose e 25% de lignina, além de outros compostos, tais como açúcares, amidos, ceras, taninos, sais inorgânicos, e dióxido de silício (Yao *et al.*, 2008).

As paredes celulares do tecido de suporte e de armazenamento do bambu são compostas principalmente por celulose. Esse homopolissacarídeo apresenta uma estrutura química constituída por ligações glicosídicas 1-4 entre as moléculas de β -glucopirranose (Xiaobo L., 2004) como se apresenta na Figura 3-8. No nível atômico a macromolécula apresenta pontes de hidrogênio ligando dois de seus três grupos hidroxilo (OH^-) intermolecularmente, e o terceiro grupo com outra macromolécula adjacente, formando assim uma estrutura química linear e impermeável à água.

As cadeias de celulose alinhadas umas com as outras constituem a fase cristalina do polissacarídeo (Garcia-Garcia *et al.*, 2013), a qual representa aproximadamente 60% de

microfibrilas. A região cristalina proporciona rigidez, enquanto a amorfa, além de proporcionar flexibilidade, gera expansão ou retração após a absorção de água, de resinas e de outras substâncias durante a infiltração (Li *et al.*, 2010). Os pacotes de macromoléculas de celulose, que compõem as paredes celulares, primária e secundária, apresentam geometrias angulares helicoidais, que se relacionam com as propriedades mecânicas do tecido que as contêm (Osorio *et al.*, 2007a).

Figura 3-8: Representação das microfibrilas de celulosa na parede celular.



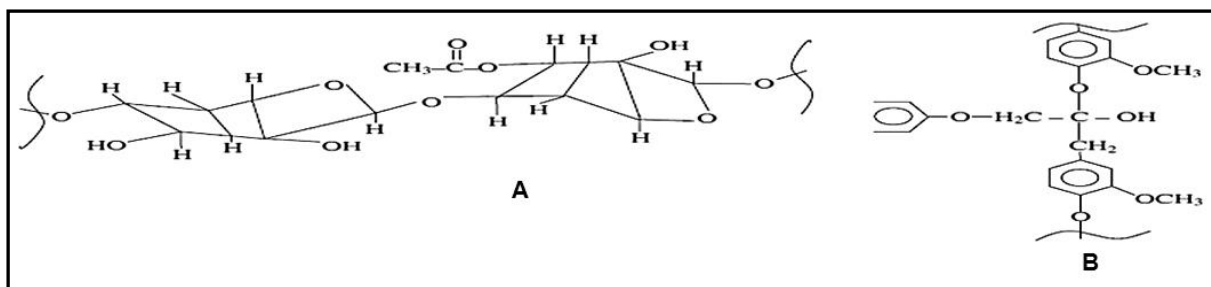
* Adaptação própria desde: <http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/Pared%20celular%20ampliada.html>

A hemicelulose é um polissacarídeo ramificado semicristalino, constituído de pentoses e hexoses como a xilose, arabinose, manose e galactose, unidas por ligações β (1-4) glicosídicas, como é mostrado na Figura 3-9A. Na parede celular primária, que representa entre 25-35%, a hemicelulose circundante serve de revestimento das microfibrilas de celulose que a constituem (Vena *et al.*, 2009). Além disso, as ligações da hemicelulose com as moléculas de pectina fornecem a porosidade à membrana celular, o que lhe confere resistência mecânica e rigidez aos tecidos (Kabir *et al.*, 2012).

Um esquema da macromolécula de lignina, que consiste em monômeros de ácidos de álcoois fenilpropílicos, unidos por ligações covalentes ou por ligações de hidrogênio para formar o biopolímero amorfo, é apresentado na Figura 3-9B (Primo, 1996). A parede secundária da célula vegetal contém alto grau de lignificação, dependendo da idade do

bambu. O biopolímero é produzido por catálise enzimática a partir dos monômeros naturais, monolignóis, sendo distribuído de forma concêntrica à parede, para aumentar a resistência mecânica do tecido que a contém.

Figura 3-9: Estruturas químicas de hemicelulose (A). Lignina (B).



* Adaptada de Primo (1996).

O processo de lignificação do bambu tem um avanço significativo entre os 4 e 6 anos de crescimento, tempo em que as paredes das células de diferentes tecidos amadurecem, e as estruturas internas dos colmos tornam-se resistentes mecanicamente permitindo utilizações na construção civil, o elevado teor de lignina na periferia do colmo, por exemplo, tem uma alta relação com a resistência à tração do bambu. A maior lignificação ocorre nas células que compõem o metaxilema e as fibras, embora algumas células parenquimáticas também sofram esse processo, o qual aumenta a hidrofobicidade do tecido.

3.1.3. *Reatividade e fixação de material lignocelulósico*

As substâncias estruturais do bambu, tais como celulose, hemicelulose, lignina, pectina e substâncias cerosas, contêm grupos funcionais que permitem reações específicas ou substituições na cadeia lignocelulósica, as quais modificam as propriedades físico-químicas e mecânicas do tecido. Por exemplo, os grupos hidroxilo dos componentes amorfos são os principais responsáveis pela hidratação e a variação dimensional, devido ao elevado carácter hidrófilo; porém, em contrapartida, esses grupos podem ser bloqueados, ou

modificados por meio de reações de esterificação ou de silanização, adicionando novos grupos que favorecem um comportamento hidrofóbico (Kabir *et al.*, 2012).

Os tratamentos químicos dependem da concentração, pressão e temperatura, principalmente (Flores, 2011). As soluções de hidróxido de sódio destroem as ligações químicas da celulose e modificam os grupos hidroxilo (OH) para convertê-los em grupos alcoxi (O^-Na^+), transformando a superfície das fibras e modificando a parte cristalina da celulose em regiões amorfas, degradando a hemicelulose e modificando a lignina. Esse tratamento aumenta a área de superfície da penetração de substâncias químicas e a resistência à absorção de água (Saurina *et al.*, 1998). No entanto, o hidróxido de sódio em excesso pode causar deslignificação do tecido (Guimarães *et al.*, 2013).

A acetilação, com anidrido acético ou ácido acético, é uma reação na qual o grupo hidroxilo hidrofílico do polisacarídeo é modificado, desta vez com um grupo acetila ($\text{CH}_3\text{-CO}$), reduzindo a humectabilidade e melhorando a estabilidade dimensional. Esse tratamento produz uma superfície áspera e reduz os espaços internos das estruturas lignocelulósicas, o que melhora a aderência com matrizes poliméricas (Kabir *et al.*, 2012)

Os peróxidos, tais como benzoílo ou dicumilo, atuam por decomposição de radicais livres sobre os grupos hidroxilo dos componentes lignocelulósicos, causando a remoção de hemicelulose e lignina, melhorando a adesão com outros grupos hidrofóbicos e aumentando a estabilidade térmica do tecido.

Os grupos hidroxilo (OH^-) dos polisacarídeos da mesma forma que os álcoois reagem com os aldeídos para formar acetais. Esse processo melhora a estabilidade dimensional do tecido, quando é complementado com o uso de formaldeído ou com resinas tipo ureia-formaldeído.

Como uma aplicação dos métodos anteriormente descritos que modificam os componentes lignocelulósicos do bambu, se encontram os métodos para a fixação dos componentes celulares, desenvolvidos para manter as células em condições estáveis e imóveis, depois de alterar a configuração tridimensional de biomoléculas, e afim de facilitar o corte do tecido em micrótomo, e a coloração intracelular de difusão de substâncias dentro de organelos para observação ao microscópio. As substâncias inorgânicas presentes em

tecidos são geralmente dissolvidas ou por vezes precipitadas por um agente de fixação. De acordo com Krishnamurthy (1999), dentre os elementos de fixação mais comuns são aldeídos tais como formaldeído e glutaraldeído, o último com menor viscosidade e grupo funcional duplo que proporciona vantagens sobre o anterior. Por sua vez, o glutaraldeído, além de preservar as partes internas das células gera reações de reticulação irreversíveis as quais mantêm a estrutura interna rígida.

Como uma aplicação dos métodos mencionados anteriormente, encontram-se os métodos para a fixação dos componentes celulares, desenvolvidos para manter as células em estados estáveis e imóveis, ao alterar a configuração tridimensional das biomoléculas dos organelos, com o fim de facilitar o corte do tecido no micrótomo e a coloração intracelular, para sua observação ao microscópio.

Entre os elementos de fixação mais comuns estão os aldeídos tais como formaldeído e glutaraldeído, sendo que o último tem menor viscosidade e seu grupo funcional é duplo, o que proporciona vantagens sobre o anterior (Krishnamurthy, 1999). Outras substâncias tais como, etanol, ácido acético, acroleína e tetróxido de ósmio também são utilizados como agentes de ligação, devido aos efeitos de desidratação, conservação ou de polimerização (reticulação de proteínas) que causam sobre as amostras e como um pré-tratamento de inclusões com resinas poliméricas (Lux, SA).

Na solução fixadora FAA, a qual é útil para a imobilização de proteínas e polissacarídeos, o formaldeído é misturado com ácido acético e álcool. O ácido acético não fixa carboidratos, mas expande os componentes protéicos, enquanto o álcool aumenta a penetração do material e gera a retração dos organelos. A solução FAA utilizada em tecidos de raízes, caules e outras partes duras de certas plantas, exerce a contração dos constituintes devido à ação do álcool e do formaldeído, enquanto que o ácido acético os dilata. O formaldeído tende a polimerizar o fenol livre presente no tecido vegetal, endurecendo-o excessivamente (Sandoval, 2005).

3.1.4. Identificação de compostos lignocelulósicos

A celulose cristalina e amorfa, a hemicelulose e a lignina apresentam claras diferenças na composição, o que permite sua caracterização individual, considerando seus componentes, capacidade calorífica, grupos funcionais, índice de cristalinidade ou ligações químicas dentre outras. Portanto, uma estrutura particular dentro de cada um desses componentes, induz respostas diferenciadas de reatividade, de capacidade de absorver umidade do meio circundante, de temperaturas de fusão, de entalpia e de reações químicas, permitindo sua identificação. O uso de métodos e matrizes vegetais de espécies diferentes têm relatado resultados semelhantes quanto à caracterização do material, pelo que a seguir se apresenta a informação que fornece uma base para a discussão dos resultados desta pesquisa.

A degradação térmica da celulose depende da sua estrutura molecular. A análise por calorimetria de varredura diferencial (DSC) indica que a temperaturas próximas de 100°C se apresenta o deslocamento da fase amorfa para temperaturas mais elevadas e o pico aumenta de tamanho, quando aumenta o teor de umidade da amostra. Numa segunda região do termograma, a ruptura das ligações glicosídicas ocorre entre 250 e 400°C, exibindo o deslocamento do domínio amorfo para o domínio cristalino (Ciolacu *et al.*, 2011). A remoção da celulose amorfa, hemicelulose e lignina por meio de tratamentos químicos, torna as amostras mais estáveis termodinamicamente do que as amostras puras, ao retardar a temperatura de decomposição (Guimaraes, 2013).

Em geral, a análise por DSC do material lignocelulósico em atmosfera de hélio apresenta um primeiro pico endotérmico em 107°C, devido à perda de água, e alguns picos endotérmicos fracos entre 207°C e 330°C, associados à desidratação e à despolimerização dos vários constituintes da amostra, incluindo a hemicelulose. Um pico endotérmico muito forte em 367°C pode ser atribuído à decomposição de celulose e um pico exotérmico acima de 400°C, relacionado com a recombinação de fragmentos de celulose e lignina (Neves *et al.*, 2012).

As análises termogravimétricas indicam que a evaporação da água das fibras pode ser conseguida a temperaturas de cerca de 70°C, e a decomposição do material amorfo como hemicelulose, pectina, celulose amorfa, aparecem entre 210°C e 343°C nos termogramas (Nguyen, *et al.*, 2013).

As vibrações específicas das ligações químicas que identificam os grupos funcionais dentro das moléculas são captadas por meio da espectroscopia na região do infravermelho (FTIR). A celulose, a hemicelulose e a lignina são constituídas principalmente pelos grupos alcanos, ésteres, cetonas, álcoois e aromáticos, com duas regiões fundamentais de absorção de radiação, a primeira entre 700 e 1800 cm^{-1} e a segunda entre 2700 e 3500 cm^{-1} (Guimarães, 2013). Além disso, os grupos aromáticos da lignina se identificam entre 1500 e 1600 cm^{-1} , enquanto que os grupos O-CH₃, C-O-C e C = C são localizados entre 1030 e 1728 cm^{-1} . Enquanto a hemicelulose, sem processos de esterificação, apresenta uma banda característica perto de 1728 cm^{-1} devida ao grupo carbonila (C = O).

A ordem espaço-molecular da estrutura cristalina é identificável por meio da análise por difração de raios-X (DRX). A análise da estrutura cristalina da celulose, e dos ângulos das microfibras de bambu, tem exibido sobre o difratograma os picos em 22,3° [002] e 15,8° [101], correspondentes aos planos longitudinais, e em 17,3°, 44,8° e 53,8° [020] relativos aos planos transversais. A parte amorfa da celulose é caracterizada em torno de 18,5°, pela presença de uma banda ampla sobre o espectrograma (Liu *et al.*, 2012). No entanto, esses picos podem variar de acordo com a espécie a partir da qual se deriva o material lignocelulósico e pelo tratamento químico aplicado nela (Li *et al.*, 2010).

3.1.4 Processo de impregnação com polímeros

A produção de materiais compósitos a partir da madeira misturados com monômeros, com o objetivo obter-se um material com propriedades mecânicas e de resistência biológica superiores às iniciais, tem aumentado nas últimas décadas. A modificação do bambu, na busca de melhorar a resistência natural à degradação biológica, torna necessária a realização de tratamentos químicos que prolonguem vida útil dos colmos (Liese, 1994). Na literatura, a

maioria de artigos publicados trata de bambu laminado ou da impregnação de outras espécies diferentes ao bambu.

Pequenas amostras de madeira de pinho (*Pinus silvestris*) de 25mmx20mmx150 mm, pré-tratadas com uma solução de bórax e ácido bórico na proporção de 1:5, e impregnadas num sistema de vácuo a 760 mmHg⁻¹ durante 30 min, utilizando-se monômeros de metacrilato de metilo (MMA) e estireno (St) 50:50, peróxido de benzoila (PBO) como iniciador e divinilbenzeno como agente de reticulação, relatam terem sido obtidas melhorias nas propriedades físicas, biológicas, mecânicas e na resistência ao fogo (Baysal *et al.*, 2007). Outros resultados similares, a partir de mostras de cinco espécies de madeira tropicais, Jelutong (*Dyera costulata*), Berbulan (*Endospermum dia- denum*), Batai (*Paraserianthes moluccana*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*), and Pulai (*Alstonia pneumatophora*), indicaram que o pré-tratamento com soluções alcalinas de hidróxido de sódio de concentração de até 10%, reduziu as impurezas e aumentou a adesão entre as fibras e a matriz de polímero, melhorando as propriedades mecânicas e morfológicas comparadas com aquelas na condição natural (Saiful *et al.*, 2012).

Pequenas lâminas de bambu de 4mmx20mmx400 mm, com umidade inferior a 10%, foram impregnadas com resina de fenol-formaldeído, através de uma polimerização por condensação a 750mmHg de vácuo, durante 1 hora, seguido de 1,5 h à pressão atmosférica. A secagem das amostras envolvidas em papel alumínio se fez a 60°C até 9 h. Os corpos de prova mostraram manchas de resina sobre o parênquima segundo as microfotografias, e se observou o aumento da resistência à compressão (Anwar *et al.*, 2009).

A imersão de lâminas de bambu em metacrilato de metila ativado com 2% de PBO, durante 5 min num sistema ao vácuo de 100 mmHg, e secas a 60°C, aumentou a sua durabilidade, evitando-se o aparecimento de fungos, especialmente na região nodal (Preechatiwong *et al.*, 2006).

O uso de pequenos corpos de prova de bambu tem sido proposto para se obter a caracterização mecânica das amostras, ao adaptar-se a norma ASTM 143-09 (Dixon e Gibson 2014), embora se tenham escassas referências de amostras impregnadas com polímeros. Atualmente, a ciência dos materiais poliméricos conta com grandes avanços que possibilitam

o melhoramento das técnicas de impregnação. Neste trabalho, propõe-se a modificação do material lignocelulósico de amostras de *B. vulgaris* orientado para um processo de impregnação com polimerização *in situ*, de baixo gasto energético e com vantagens econômicas.

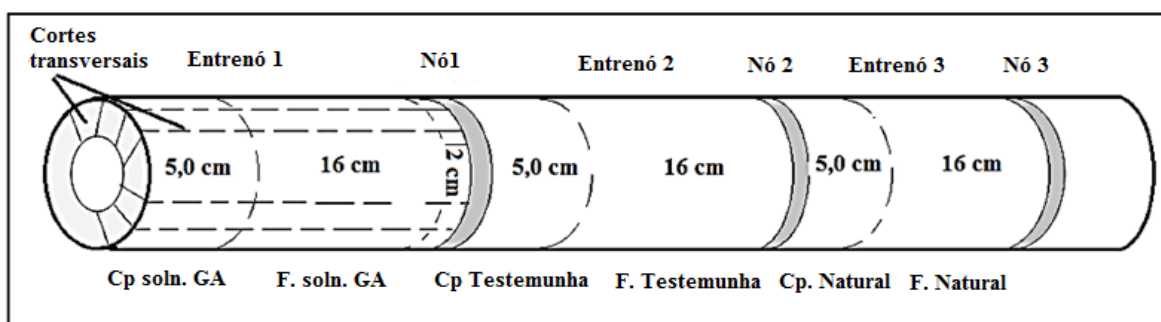
3.2 Metodologia

Em relação ao objetivo geral desta tese, esta seção fornece os procedimentos adotados para a produção e caracterização das amostras de bambu *B. vulgaris* naturais, além daquelas infiltradas com substâncias fixadoras de tecidos vegetais e as posteriormente impregnadas com polímero.

3.2.1. Produção dos corpos de prova do bambu

Peças do *B. vulgaris*, maduros e retos extraídos da região média dos colmos, provenientes do bambuzal próximo à Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa, Brasil), foram cortados em peças cilíndricas, selecionando-se a parte do entrenó e deixando 2 cm de distância para o nó. Os corpos de prova foram identificados para cada tratamento e para cada ensaio. O comprimento médio dos entrenós era de 25,4 cm, o qual permitiu obter as amostras necessárias para os ensaios de flexão e compressão paralela e perpendicular às fibras usando o mesmo entrenó para cada tratamento em estudo, como se indica na Figura 3-10. O material restante se destinou à determinação do conteúdo de umidade, e de absorção da água.

Figura 3-10. Seccionamento das peças para a elaboração do corpo de prova.



Fonte: própria

Os corpos de prova de bambu foram elaborados a partir das peças cilíndricas (Fig. 3-11A e 3-11B) adaptando-se a norma ASTM 143-09 “*Standard test methods for small clear specimens of timber*”, conforme descrito por Dixon e Gibson, (2014), e Osorio *et al.*, (2007b). A casca remanescente e a epidermes da área interna da parede do colmo foram retiradas das amostras por meio de lixa (Fig. 3-11C). As amostras para o ensaio de compressão paralela e perpendicular às fibras foram elaboradas mantendo-se a proporção 1:1:4 de espessura: largura: comprimento, e as do ensaio de flexão e de absorção de água, utilizando-se a proporção 1:1:15 de espessura: largura: comprimento. Todas as amostras se armazenaram nas mesmas condições de temperatura e umidade relativa (Fig 3-11C e 3-11D). No total foram elaborados 437 corpos de prova prismáticos durante a pesquisa.

Os dados finais, do presente trabalho foram os obtidos na quarta produção de corpos de prova durante esta pesquisa. As amostras foram armazenadas entre 5,0 °C e 7,0 °C e entre 55% e 61% de umidade, e sendo os processos de infiltração e de impregnação realizados a temperatura ambiente entre 20°C e 26°C. As amostras foram marcadas em três pontos diferentes para cada grandeza medida, sendo esse ponto a referência utilizados para realizar as medidas (espessura, comprimento e largura), necessárias para determinar o valor médio da área sobre a qual se aplicou a carga.

Figura 3-11. Elaboração dos espécimens de bambu *B. vulgaris* Corte de entrenós (A), lixado dos corpos de prova (B), rotulagem das amostras (C) e armazenamento (D).



Fonte: Própria

Em todas as análises em estudo, sempre se mantiveram amostras de referência, sendo um grupo delas em condições ambientais, com umidade natural, doravante chamadas de Natural (N), e outro grupo de amostras submetidas à secagem em estufa somente, denominadas de testemunhas térmicas (T), as quais acompanharam sempre os processos das outras amostras. Na Tabela 3-1 apresenta-se a distribuição das amostras utilizadas neste estudo.

Tabela 3-1. Distribuição e identificação das amostras de bambu *B. vulgaris*.

Número de amostras	Parâmetro	Sigla
137	Determinação e avaliação do processo de infiltração de substâncias fixadoras e impregnação com polímeros.	
40	Natural (N)	N
40	Testemunho térmico (T)	T
40	Tratamento com solução FAA (FAA)	FAA
40	Tratamento com glutaraldeído a 2,5% (GA)	GA
40	Impregnação com copolímero poli(estireno-co- metacrilato de metilo) sem pre-tratamento com glutaraldeído	SM
40	Tratamento com glutaraldeído e impregnação com poli(estireno-co- metacrilato de metilo)	GA-SM
40	Tratamento com glutaraldeído e impregnação com poli(estireno-co-metacrilato de metilo-acrilato de butilo)	GA-SMB

* Foram utilizados diferentes códigos para identificar as amostras durante os ensaios prévios.

** O número de amostras foi dividido em partes iguais entre os quatro ensaios a serem avaliados: compressão paralela às fibras, flexão, compressão perpendicular às fibras, absorção de água.- Fonte: Própria

3.2.2. Infiltração com soluções fixadoras de tecido—Adaptação da Norma ASTM D 1413-99

Um grupo de amostras foi infiltrado com solução de glutaraldeído 2,5% em solução tampão de fosfato sódico pH 7,5, e outro grupo com solução FAA, (4% formaldeído, 4% ácido acético, 55% álcool etílico) adaptando-se a norma ASTM D 1413-07 conforme descrito por Anwar *et al.* (2009). Em um recipiente de vidro, como se apresenta na Figura 3-12, se colocou uma peça plástica que continha as amostras, e se ajustou o sistema de infiltração ao vácuo de 550 mmHg⁻¹ durante uma hora. Terminado o tempo, sem desconectar o sistema de vácuo, infiltrou-se o glutaraldeído por meio de uma válvula, e se manteve o vácuo por mais uma hora. Depois, se liberou o sistema até alcançar a pressão atmosférica, deixando as amostras nessa condição durante mais uma hora.

Figura 3-12. Sistema de infiltração e impregnação.



Fonte: Própria

As amostras retiradas da solução, medidas e novamente pesadas, foram envolvidas com papel alumínio (Fig 3-13), e foram secas no forno a 50°C, por 72 h. As amostras secas, junto com as amostras natural (N) e as testemunhas térmicas (T), foram pesadas e tiveram medidas suas arestas novamente.

Figura 3-13. Preparação das amostras para o processo de secagem.



Fonte: Própria

A percentagem de variação volumétrica (V) e a variação em massa (m) se determinaram utilizando-se, respectivamente, as seguintes equações.

$$V (\%) = \left[\frac{(V_f - V_i)}{V_i} \right] \times 100 \quad \text{Eq. 3-1.}$$

$$m (\%) = \left[\frac{(m - m_o)}{m_o} \right] \times 100 \quad \text{Eq. 3-2}$$

Onde V_i é o volume da amostra sem tratar e V_f o volume da amostra após do processo de infiltração. Sendo m a massa da amostra após da absorção e m_0 a massa inicial da amostra. Estas medidas foram realizadas nas amostras úmidas também logo após a secagem. Os corpos de prova foram marcados em três pontos diferentes, como referência para realizar as medições de espessura (h), largura (b) e comprimento (L), medidas necessárias para determinar-se a densidade (ρ), o coeficiente de retração em cada direção, espessura (ε_{rh}), largura (ε_{rb}) e comprimento (ε_{rL}), de acordo com as seguintes equações:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. 3-3}$$

$$\varepsilon_{rh} = \frac{ts - tn}{tn} \times 100 \quad \text{Eq. 3-4}$$

$$\varepsilon_{rb} = \frac{ws - wn}{wn} \times 100 \quad \text{Eq. 3-5}$$

$$\varepsilon_{rL} = \frac{hs - hn}{hn} \times 100 \quad \text{Eq. 3-6}$$

$$A_r = \frac{\varepsilon_{r.tang}}{\varepsilon_{r.rad}} \times 100 \quad \text{Eq. 3-7}$$

Sendo m a massa, V o volume, h a espessura, b a largura, e L o comprimento das amostras secas na estufa (s), e das amostras com umidade natural (n), é dizer, aquelas na condição inicial do ensaio. ε_r se refere à retração parcial tangencial (ε_{rb}) e retração parcial radial (ε_{rh}).

3.2.3. Impregnação com monômeros e polimerização in situ

As impregnações se realizaram sobre grupos de dez corpos de prova, considerando-se os diferentes ensaios, compressão e flexão, e os pré-tratamentos com a solução de glutaraldeído 2,5%. Duas misturas de monômeros foram utilizadas sobre os corpos de prova sem e com pré-tratamento. Um grupo de corpos de prova foi infiltrado com misturas de monômeros de estireno e de metacrilato de metila na proporção em massa 1:1, e outro grupo com a mistura de monômeros de estireno, metacrilato de metila e acrilato de butila na proporção 2:2:1, respectivamente.

As misturas de monômeros foram adicionadas com 1,0 % de peróxido de benzoila e dodecilmercaptano a 0,5% como agente de transferência de cadeia. As misturas foram pré-ativadas a 60°C durante 1 hora para iniciar a reação de polimerização, antes de ser infiltradas nas amostras adaptando-se a norma ASTM D 1413-99. Uma vez terminado o processo, se mediram as arestas e se pesaram novamente as amostras, que foram envolvidas em seguida com papel alumínio e levadas ao forno a 50°C, por 24 h, realizando-se medições até atingirem massa constante. Após essa duração, as amostras foram pegasadas sem papel alumínio e tiveram medidas novamente suas arestas. Durante o processo se mantiveram amostras em sua condição natural e testemunhas térmicas como referência. Determinou-se a variação volumétrica e o incremento de massa nas amostras de acordo com as equações 3-1 e 3-2, utilizando-se os dados das amostras úmidas e secas.

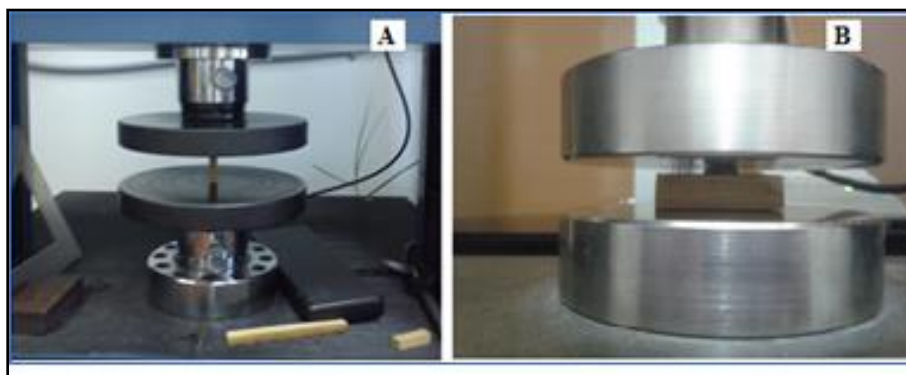
3.2.4. Ensaios mecânicos- Adaptação da norma ASTM 143-09

O ensaio de compressão paralela às fibras (Cp) se realizou em corpos de prova de proporção 1:1:4, identificados com o tratamento que será feito sobre a amostra. Os ensaios se realizaram na máquina de ensaios universal, Computer Servo Control Material Testing Machine, a velocidade de 0,01 mm/s (Fig 3-14A). Os corpos de prova foram colocados diretamente entre os pratos de carga e as curvas obtidas se reportaram como esforço-deformação. As dimensões dos corpos de prova, espessura (h), largura (b) e comprimento (L), foram medidas em dois pontos diferentes antes do ensaio. As faces transversais dos corpos de prova foram cortadas no minitomo Struers e polidas com lixa para madeira de grã 200 para obter paralelismo entre as faces. Os corpos de prova foram pesados antes e ao finalizar o ensaio, e após foram levados à estufa a 105°C durante 24 h, e pesadas novamente até registrar uma diferença entre de leituras inferior a 0,01 g, para se obter o teor de umidade.

Esse procedimento também foi utilizado para realizar o ensaio de compressão perpendicular às fibras (Cr), mudando-se a posição do corpo-de-prova. A face externa do corpo de prova foi apoiada na placa inferior da máquina universal de ensaios, como se observa na Figura 3-14B, colocando-se uma placa de aço sobre o centro da face paralela à placa superior da máquina, ou seja, no centro da face interna do corpo de prova.

Os corpos de prova foram secados durante 24 h a 50°C antes de se realizar os ensaios mecânicos, como um fator de correção da umidade das fibras, já que algumas análises prévias tinham indicado que esse era o procedimento adequado para alcançar valores de umidade entre 9% e 13% depois de terem sido retirados da geladeira, além de ajustar a memória térmica do polímero nas amostras impregnadas.

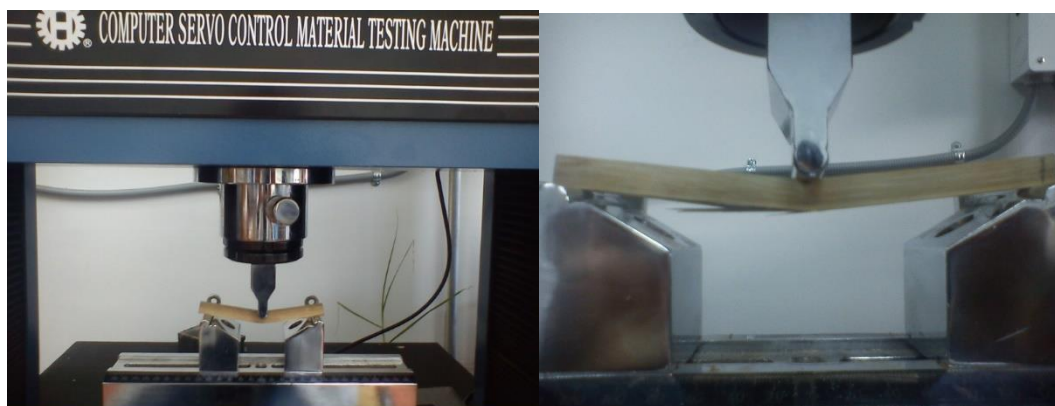
Figura 3-14. Ensaio de compressão paralela às fibras (A), ensaio de compressão perpendicular às fibras (B).



Fonte: Própria

O ensaio de flexão (F) foi aplicado aos corpos de prova de proporção 1:1:15, empregando-se a máquina universal de ensaios, Computer Servo Control Material Testing Machine, como se apresenta na Figura 3-15. A velocidade de aplicação da carga foi de 0,04 mm/s. Foram realizadas três medições sobre as arestas dos corpos de prova, os quais foram identificados com a letra F, seguido do tratamento feito sobre a amostra.

Figura 3-15. Ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Própria

A partir da curva de carga vs deslocamento se obtiveram os valores de esforço no limite de elasticidade (σ_{LE}), a carga máxima (P_{max}) e o módulo de elasticidade (E), por meio das Equações 3-8 e 3-9:

$$\sigma_{LE} = \frac{0,75M_{max}}{S} \quad \text{Eq. 3-8}$$

$$E = \frac{PL^3}{48\Delta I} \quad \text{Eq. 3-9}$$

O esforço no limite de proporcionalidade se calculou para cada corpo de prova adotando-se 75% da carga máxima alcançada no ensaio. Na Equação 3-8, S indica o módulo elástico da seção, L a distância entre apoios, M_{max} o momento máximo no centro de L e P_{max} a força máxima aplicada. O módulo de elasticidade se calculou usando o grupo de dados entre 20% e 75% da carga máxima (P_{max}), sendo que Δ , na Equação 3-9, indica o deslocamento no centro de L , e sendo I o momento de inercia da seção transversal.

3.2.5. Microscopia óptica – Adaptada de Liese (1994)

As superfícies dos corpos de prova foram coloridas com safranina para ser observadas no microscópio de luz Carl Zeiss Axiotech 30. As amostras foram aquecidas durante 30 min a 80°C para corrigir a memória térmica do polímero antes de serem microfotografiadas. Foram utilizadas ampliações de 5X, 10X e 20X no microscópio.

3.2.6. Microscopia eletrônica de varredura (SEM) – adaptada de Gebizlioghu et al. (1990)

As morfologias exibidas pelo polímero e pelas amostras impregnadas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (SEM) mediante as mesmas condições das amostras de material vegetal natural. Foram observados os cortes transversais e axiais das amostras, os quais foram obtidos por meio do minitomo Struers utilizando-se 350 rpm e água destilada como lubrificante (Fig. 3-16). As amostras foram revestidas com uma camada de ouro e analisadas no microscópio eletrônico de varredura modelo Leo 1430 Zeiss, ao vácuo, corrente 120 pA, e tensão de aceleração de 10kV. As microfotografias foram tomadas com aumentos de 500, 1000 e 3000x.

Figura 3-16. Corte das amostras usando minitono Struers.



Fonte: Própria

3.2.7. Espectroscopia no Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) - adaptada de Cerrada. et al. (2001)

Quatro (4) amostras de cada grupo em estudo, foram cortadas e pulverizadas utilizando-se um moinho de facas de aço tipo Willye Star FT 50 (Fig. 3-17). Aproximadamente 2% do material em pó passante por peneira de 200 mesh foi misturado com brometo de potássio, para produzir a pastilha empregando-se para tal, uma prensa hidráulica.

Figura 3-17. Processo de moagem das amostras.



Fonte: Própria

A análise foi realizada no espectrofotômetro de marca Shimadzu, modelo: FTIR-8400S, de serie IRAffinity-1, acoplado com o módulo HATR MIRacle, e com prisma de ZnSe. A varredura foi realizada na região entre 4000 e 600 cm^{-1} , utilizando 32 varrimentos e resolução de 4 cm^{-1} .

3.2.8. Difração de Raios-X. (DRX) – Adaptada de Liu et al. (2012)

As amostras pulverizadas e passantes através da peneira de 200 mesh foram analisadas no difractômetro de marca Siemens, modelo D5000, a 30 kV e 15 mA. As leituras foram realizadas a 5 °/min entre 10 e 60 °.

3.2.9. Calorimetria de varredura diferencial (DSC)- Adaptada de Bing Meng et al. (2012)

Aproximadamente 4,0 mg de cada amostra pulverizada e passantes por peneira de 200 mesh foi analisada no equipamento DSC-60 Shimadzu, com fluxo de 50 mL/s de nitrogênio e velocidade de aquecimento de 10°C/min, na faixa entre 25 e 450°C.

3.2.10. Análise termogravimétrica (TGA) -Adaptada de Leskovac et al. (1999)

Amostras de, aproximadamente, 5,0 mg do material em pó passantes por peneira de 200 mesh, se analisaram no DTG-60H Shimadzu utilizando-se uma cápsula de platina em ambiente de nitrogênio, com fluxo de gás de 50 mL/s e com velocidade de aquecimento de 20°C/min.

3.2.11. Percentagem de absorção parcial de água

A percentagem de absorção de água (W.A.) se determinou de acordo com a Equação 3-10, onde m é a massa da amostra após 1, 8, 24, 48, 320 e 726 h de tempo de absorção, e m₀ é a massa da amostra na condição inicial.

$$\text{W.A. (\%)} = \left[\frac{(m - m_0)}{m_0} \right] \times 100 \quad \text{Eq 3-10}$$

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresentam-se e discutem-se os resultados das investigações feitas neste trabalho.

3.3.1 Avaliação de um sistema inicial de infiltração

A distribuição dos tecidos fundamentais dentro do colmo varia com seu comprimento (Prieto, 2004), e por esta razão, nesta investigação foi empregada a parte do colmo reconhecida como a parte média, sendo a região pertencente ao corte entre 4 m e 7 m desde a base. A caracterização morfológica realizada sobre cortes transversais do *B. vulgaris* permitiu identificar a distribuição e o tamanho dos vasos de metaxilema. Os feixes vasculares apresentaram organização em ordem crescente a partir da casca para o interior do colmo, encontrando-se metaxilemas com diâmetros entre 40 μm e 236 μm , enquanto a distribuição das fibras aumentava na direção oposta, no sentido interior para o exterior.

No Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas, LABEME, da Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa), foi desenvolvido um sistema de impregnação com base nos princípios do método de Boucherie modificado adaptado para o uso de 2 L de solvente (Fig. 3-18A), com o qual se realizaram infiltrações com água quente para remover substâncias solúveis do tecido interno do bambu (Fig. 3-18B). O líquido amarelado que atravessou o comprimento do colmo, continha algumas partículas em suspensão, que após da secagem em condições ambientais, resultaram em um resíduo sólido da cor amarela, possivelmente contendo amido, sais inorgânicos e açúcares, entre outros compostos, sendo que a solubilidade desses produtos em água quente é de 15% (Pereira e Beraldo, 2008).

Figura 3-18. Processo de deslocamento de substâncias ao longo do colmo do bambu.



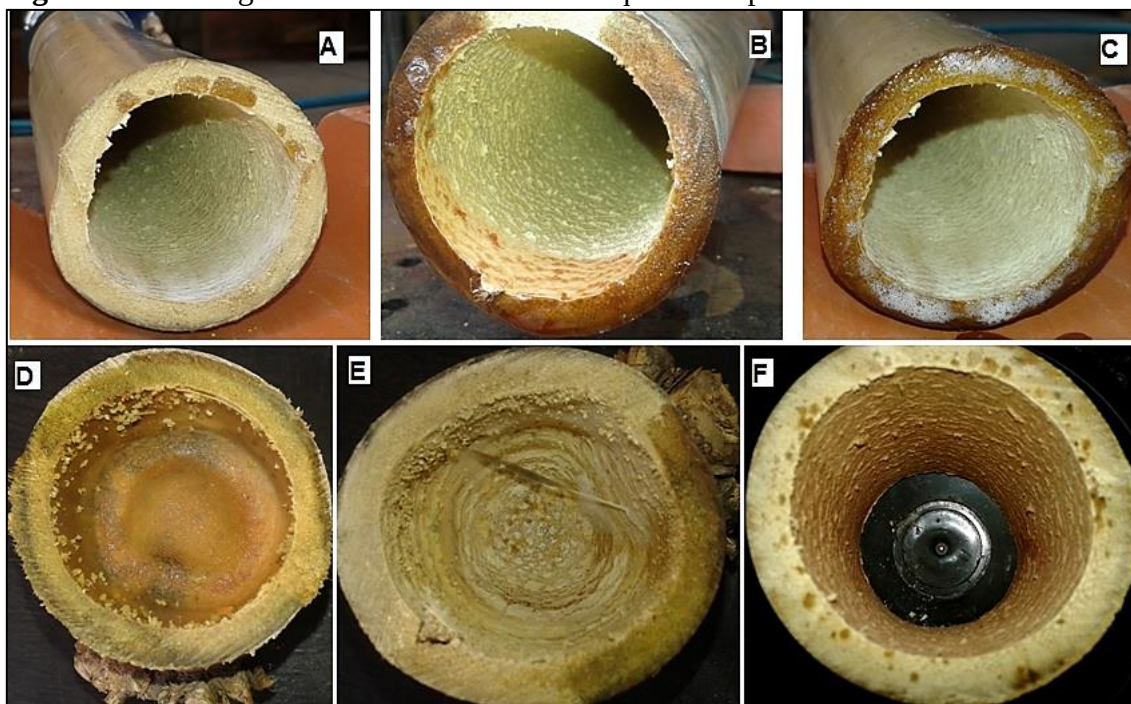
Fonte: Própria

Na fase inicial deste trabalho, foram realizadas as infiltrações de água empregando-se um sistema de compressor de ar e pistão, para aumentar o fluxo de substâncias no interior do colmo. Na Figura 3-20 indica-se como ocorreu a passagem de água por um colmo de aproximadamente 40 cm que apresentava apenas um nó.

Inicialmente, nos primeiros 10 s, aparecem as primeiras gotas (Fig. 3-19A), e em menos de 2 min, a superfície fica totalmente umedecida (Fig. 3-19B); após 10 min de ser evidenciado o fluxo através de toda a área superficial, a pressão foi desativada (Fig. 3-19C) e a seguir, o colmo foi cortado acima do nó (Fig. 3-19D), tendo-se observado a presença de umidade na superfície total, mas em um corte feito após do nó, se percebeu que o líquido cobria apenas parcialmente a superfície (Fig. 3-19E). Em um corte realizado imediatamente antes da extremidade do colmo (Fig. 3-19F) foram observados só alguns pontos de presença de umidade, sobre a superfície.

Do dito anteriormente, pode ser inferido que, a seção transversal exposta no final do colmo, através da qual flui o líquido, se umedece lentamente, e devido às forças de tensão superficial, a adsorção e à ação da gravidade, o líquido cobre completamente a área de saída, denotando que a água escoou através de todo o tecido interno. No entanto, apesar de se ter a percepção de vazamento de líquido no colmo, isso não é um fato conclusivo para confirmar que o líquido flue por todos os vasos da planta.

Figura 3-19. Fotografias do deslocamento do líquido sob pressão através dos colmos.



Fonte: Própria

Os resultados da lavagem utilizando-se água como solvente são apresentados na Tabela 3-2. As medições do fluxo hidrodinâmico durante 60 min mostraram que alguns colmos não permitiram a passagem de líquido, possivelmente devido a obstruções relacionadas em grande parte com o complexo sistema capilar intersticial do tecido, e pela presença de nós no colmo. De acordo com a Tabela 3-2, após cada lavagem os colmos aumentaram de peso devido à absorção de água, apesar de ter sido observada a lixiviação de substâncias. No entanto, após uma secagem em condições ambientes, durante 1 semana, se observou a perda de massa com respeito à massa inicial.

Tabela 3-2: Dimensões do colmo e fluxo de água neles.

Número de nós	Diâmetro interno (cm)	Diâmetro externo (cm)	Área da circunferência (cm ²)	Comprimento (cm)	Volume do colmo (cm ³)	Fluxo (mL/min)
1	16,18	17,70	15,00	83,30	1249,70	7,20
	17,74	19,05	12,90	78,70	1017,50	3,54
	15,25	16,76	14,90	67,40	1004,50	11,10
Média	16,39	17,84	14,27	76,47	1090,57	9,15
σ	1,26	1,15	1,18	8,18	137,97	2,76
2	15,40	17,27	18,50	127,90	2360,60	0,00
	17,02	18,53	14,90	116,40	1730,10	11,30
	15,90	17,35	14,30	119,80	1712,10	3,20
Média	16,11	17,72	15,90	121,37	1934,27	4,83
σ	0,83	0,71	2,27	5,91	369,33	5,82
3	17,98	19,82	18,20	114,50	2081,60	9,40
	18,18	20,34	21,30	136,20	2898,20	3,70
	16,46	18,65	21,60	129,50	2796,50	0,00
Média	17,54	19,60	20,37	126,73	2592,10	4,37
σ	0,94	0,87	1,88	11,11	445,02	4,74

σ – desvio-padrão- Fonte: Própria

Os valores das Tabelas 3-2 e 3-3 permitiram avaliar a eficiência do sistema de infiltração adaptado para esta pesquisa. De acordo com os resultados, a infiltração é susceptível às características internas do bambu, e não se encontrou nenhuma distribuição normalizada dos dados do escoamento através do tecido, nem no ganho nem na perda de massa durante o processo de lavagem. A variabilidade foi significativamente alta. Quanto ao número de nós, torna-se possível observar que interfere no fluxo, mas não foi possível obter uma relação matemática entre tais valores e o processo de infiltração. Portanto, apesar de esta técnica de preservação ser amplamente utilizada no bambu, deve-se avaliar o mecanismo de absorção das soluções no interior dos tecidos, como sugeriu Espelho (2007), elucidando que em alguns colmos não se tornou possível efetuar a infiltração de substâncias devido à natureza complexa própria da anatomia do bambu.

Tabela 3-3. Variação da massa nos colmos em relação ao fluxo de água.

Número de nós	Fluxo (mL/min)	Massa inicial (g)	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Variação de massa do colmo após infiltração (%)	Variação de massa do colmo infiltrado após secagem (%)
1	7,2	1350,0	1520,0	1220,0	12,6	-8,5
	3,5	1310,0	1340,0	1225,0	2,3	-6,3
	11,1	1125,0	1210,0	1070,0	7,6	-4,5
Média	9,2	1261,7	1360,0	1171,7	7,5	-6,5
σ	2,8	120,0	155,7	88,1	5,2	2,0
2	0,0	1540,0	1590,0	1455,0	3,2	-5,3
	11,3	1780,0	1890,0	1620,0	6,2	-8,5
	3,2	2710,0	2880,0	2490,0	6,3	-7,6
Média	4,8	2010,0	2120,0	1855,0	5,2	-7,1
σ	5,8	618,0	675,1	556,1	1,7	1,6
3	9,4	2890,0	2925,0	2730,0	1,2	-5,5
	3,7	2480,0	2520,0	2315,0	1,6	-6,6
	0,0	2740,0	2765,0	2675,0	0,9	-2,3
Média	4,4	2703,3	2736,7	2573,3	1,2	-4,8
σ	4,7	207,4	204,0	225,4	0,4	2,2

σ – desvio-padrão- Fonte: Própria

Em geral, o uso do sistema de infiltração de solventes sob pressão apresentou inconvenientes na medição da vazão. O comportamento inadequado foi observado em colmos recém-cortados, em colmos armazenados em água ou em colmos secos durante uma semana em condições ambiente. Os resultados não apresentaram tendências estatísticas que confirmassem uma distribuição normal com a qual poder-se-la definir as variáveis de estudo do processo de infiltração. No entanto, deve ser ressaltado que os resultados obtidos se referem ao sistema de infiltração desenvolvido e ajustado para esta pesquisa, e não aos sistemas hidráulicos ou pneumáticos conduzidos industrialmente para impregnação de substâncias no bambu e na madeira.

Tendo em conta os resultados obtidos utilizando sistemas sob pressão, que não se mostrou muito eficiente, implementou-se neste trabalho o método de infiltração a vácuo de substâncias adaptado da norma ASTM D 1413-99 (*Standard Test Method for Wood*

Preservatives by Laboratory Soil-Block Cultures). Tal estratégia visou melhorar para melhorar a reprodutibilidade dos resultados e permitir maior controle sobre os parâmetros de medição. Por outro lado, para o processo de infiltração foram selecionadas as substâncias fixadoras e preservantes de tecidos, solução FAA (formaldeído, álcool e ácido acético) e solução de glutaraldeído 2,5%, devido aos seus efeitos de desidratação, como são os casos do álcool e do ácido acético, ou do poder reticulante dos componentes lignocelulósicos, como é próprio do glutaraldeído e do formaldeído (Roshan, 2014).

Nos ensaios prévios, as amostras secas ao ambiente, com teor de umidade inferior a 12% foram infiltradas com água empregando-se o sistema a vácuo descrito na metodologia, com o fim de determinar o tempo de secagem. Durante 30 min se extraiu o ar da câmara que contém os corpos de prova, e em seguida, se desligou a bomba e se permitiu que a solução conservante entrasse em contato com as amostras, instante no que se observou a aparição de bolhas sobre a superfície das amostras, o que indica a extração de ar. O sistema foi mantido fechado por 60 min permitindo atingir a pressão atmosférica, quando as amostras foram removidas e cobertas com papel de alumínio para serem secas em estufa a 50°C.

A temperatura de secagem a 50°C foi escolhida a fim de reduzir a modificação química do material lignocelulósico. Evitando-se que ocorressem algumas reações de polimerização de polisacarídeos e a desidratação das fibras a maiores temperaturas. Note-se que a Norma Colombiana sobre estruturas de Guadua (AIS G-112 , 2010) limita a 65°C a temperatura a qual o bambu pode ser submetido sem que seja afetado de forma significativa seu comportamento mecânico.

Utilizando-se o sistema adaptado da ASTM D 1413-99, foram feitas infiltrações de água em corpos de prova pequenos de relação 1:1:4 entre dimensões, e os resultados se exibem na Tabela 3-4. Ao colocar as amostras no sistema de infiltração de água a vácuo, elas passaram da umidade natural (cerca de 15%) para 30% de umidade. As amostras foram colocadas na estufa a 50°C, até se chegar à mínima variação na sua massa, o que ocorreu em um tempo entre 48 h e 72 h, como se vê na Tabela 3-4. Os valores negativos na variação de umidade são devidos à perda de material do interior do bambu por lixiviação e pela umidade final situar-se abaixo daquela inicial ou natural.

Tabela 3-4. Secagem das amostras infiltradas com água.

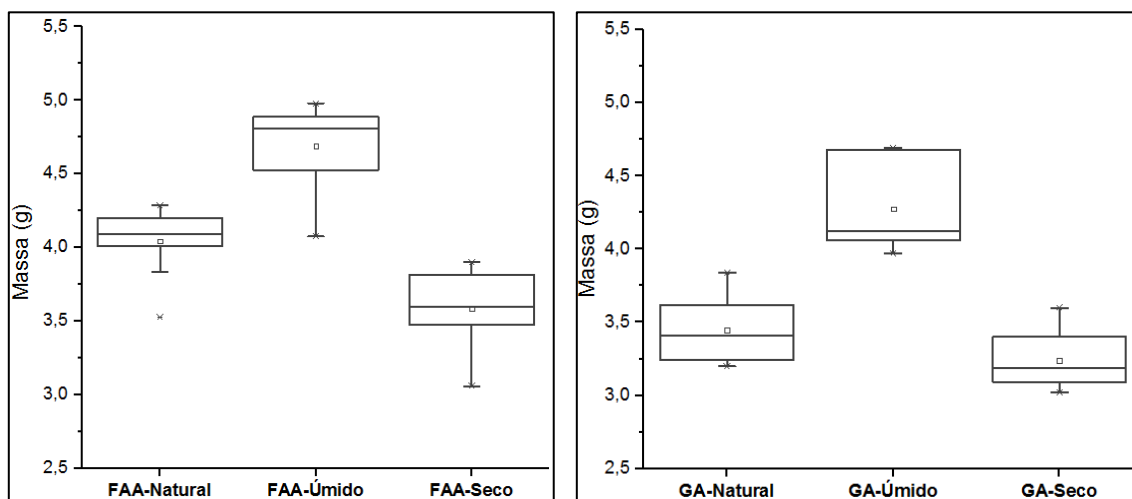
Parâmetro	Varição de Umidade* (%)	σ	C.V. (%)
Úmida	29,9	3,5	11,6
Seca (24 h)	16,9	2,0	11,7
Seca (48 h)	9,8	1,7	17,5
Seca (72 h)	-5,9	0,5	-8,7
Seca (96 h)	-6,4	0,5	-7,2

Foram utilizadas nove (9) amostras. *Diferença entre as médias percentuais da umidade inicial com a final; , σ : Desvio-padrão, C.V: Coeficiente de variação Fonte: Própria

3.3.1.1. Infiltração das substâncias fixadoras de tecido nas amostras de *B. vulgaris*

As distribuições das massas dos corpos de prova, naturais (estado inicial), úmidos infiltrados, e infiltrados e secos na estufa estão indicadas nos diagramas de caixa da Figura 3-20. A simetria da distribuição das medidas em diferentes quartis mostra algumas diferenças entre os resultados obtidos para os diversos tratamentos, com solução de glutaraldeído a 2,5% e com solução FAA. Em geral, os tratamentos exibiram uma ampla dispersão dos dados, porém o tratamento com solução GA apresentou maior aumento de massa em úmido, enquanto o tratamento com FAA apresentou maior perda de massa após da secagem. A partir do exposto, conclui-se que os tratamentos, especialmente o uso da solução FAA, causam maior lixiviação das espécies solúveis presentes nas amostras. Os resultados da análise estatística aplicando-se o test t para amostras pareadas, se apresenta no Anexo 1. A comparação indicou que as amostras tratadas com FAA, úmidas e secas, apresentaram diferenças significativas em relação com amostras naturais, enquanto que as amostras tratadas com GA e secas não apresentaram diferença significativa com respeito às amostras naturais.

Figura 3-20. Diagramas de caixa da distribuição da massa das amostras tratadas com solução FAA e solução de glutaraldeído (GA).



Fonte: Própria

As amostras utilizadas no tratamento químico tiveram eliminadas o nó e a casca, com o fim de diminuir a restrição do fluxo das substâncias para o interior da amostra. Após da infiltração com solução FAA, as amostras apresentaram variação em sua forma prismática, sendo que algumas delas, após a secagem, mostraram retração nos extremos das faces transversais que inicialmente eram paralelas (Fig. 3-21). A modificação do prisma poderia estar relacionada com a perda de material por lixiviação ou pelo processo descontínuo de secagem da amostra.

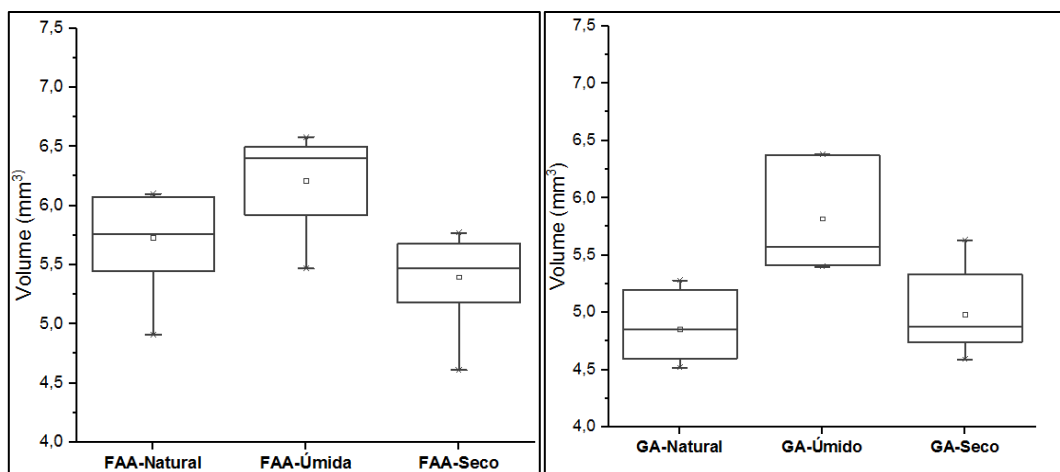
Figura 3-21. Variação dimensional pós-tratamento.



Fonte: Própria

Os resultados da variação volumétrica das amostras durante os diferentes tratamentos estão apresentados nos diagramas de caixa da Figura 3-22. Os bigodes da distribuição dos dados são assimétricos, o que implica uma distribuição não simétrica dos valores. As amostras secas, tratadas com solução de GA, não mostraram variação significativa da sua forma prismática contrariamente ao caso da utilização da solução de FAA. Em geral, os resultados mostram, além da dispersão das medidas com respeito à média alguns valores atípicos; no entanto, se evitou a eliminação desses dados, uma vez que se pretende levar em conta a variabilidade dos resultados numa matriz complexa, tal como é o tecido vegetal do bambu. De acordo com o test t para amostras pareadas (Anexo A), o tratamento de infiltração implicou em mudanças significativas no volume das amostras, ou seja, a variação do volume resultou significativa no nível de confiança da análise.

Figura 3-22. Diagramas de caixa da distribuição do volume das amostras tratadas com solução FAA e solução de glutaraldeído (GA).

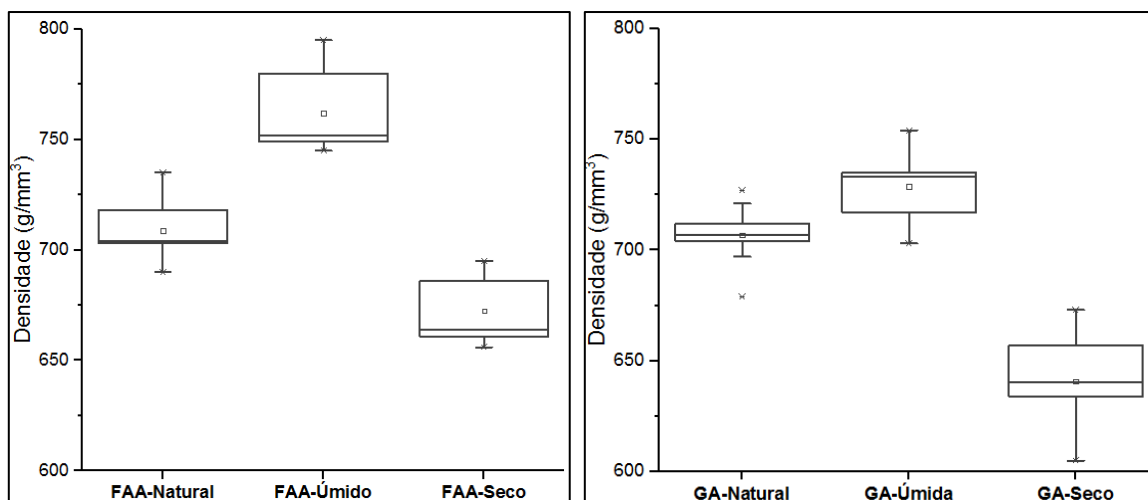


Fonte: Própria

Na Figura 3-23 apresnta-se as densidades medidas sobre os corpos de prova. As médias das amostras naturais com conteúdo de umidade de 14% se encontraram entre 626 kg/m³ e 739 kg/m³, valores próximos a 635 kg/m³ e 694 kg/m³ relatados por Moreno, *et al.* (2007), para os colmos de *B. vulgaris* com um teor de umidade de 12%. As amostras infiltradas na condição úmida aumentaram a densidade, o que confirma que o aumento da

massa é superior ao inchamento apresentado pelas amostras. No entanto, depois da secagem esses valores diminuíram, como era esperado, já que com o tratamento diminuíram a massa e o volume das amostras. O test t para amostras pareadas (Anexo A) indicou que as amostras tratadas com GA são significativamente diferentes em relação às amostras naturais, que aquelas tratadas e secas com FAA não exibiram diferença das médias comparadas no intervalo de confiança da análise.

Figura 3-23. Diagramas de caixa da distribuição da densidade das amostras tratadas com solução FAA e solução de glutaraldeído (GA).



Fonte: Própria

A variação porcentual da massa, o volume e a densidade das amostras tratadas com GA são apresentadas na Tabela 3-5. Pode-se notar que o tratamento causou um aumento na massa das amostras úmidas de 24,0% e uma diminuição de 6,3% após a secagem, em relação às amostras naturais. Portanto, os volumes das amostras apresentaram um incremento tanto na condição úmida como na condição seca, tendo como efeito a diminuição dos valores da densidade.

Tabela 3-5. Análise estatística das amostras infiltradas com solução GA.

Variável	Amostra	Media	DS	CV	Variação (%)
Massa (g)	GA-Natural	3,5	0,21	5,9	
	GA-Úmido	4,3	0,29	6,6	24,0
	GA-Seco	3,3	0,19	5,7	-6,3
Volume (cm³)	GA-Natural	4,9	0,30	6,1	
	GA-Úmido	5,9	0,45	7,6	20,3
	GA-Seco	5,1	0,40	7,8	3,5
Densidade (kg/m³)	GA-Natural	707	13,95	2,0	
	GA-Úmido	729	15,66	2,1	3,1
	GA-Seco	641	23,57	3,7	-9,3

Fonte: Própria

O tratamento com solução FAA mostrou que o ganho de massa das amostras foi de 16% na condição úmida e que após do processo de secagem as amostras tiveram suas massas diminuídas em 17,8% (Tabela 3-6), confirmando uma maior lixiviação de substâncias em relação ao tratamento com GA. Em relação ao volume, o tratamento causou uma retração do volume após secagem de 13,3%. A relativa baixa variação da densidade em relação às amostras naturais, se deve ao fato de que tanto a massa como o volume das amostras diminuíram em proporções similares.

Tabela 3-6. Análise estatística das amostras infiltradas com solução FAA.

Variável	Amostra	Média	DS	CV	Variação (%)
Massa (g)	FAA-Natural	4,0	0,24	5,9	
	FAA-Úmido	4,7	0,28	6,0	16,0
	FAA-Seco	3,6	0,26	7,2	-17,8
Volume (cm³)	FAA-Natural	5,7	0,39	6,9	
	FAA-Úmido	6,1	0,40	6,5	8,0
	FAA-Seco	5,4	0,35	6,6	-13,3
Densidade (kg/m³)	FAA-Natural	711	14,30	2,0	
	FAA-Úmido	764	19,62	2,6	7,5
	FAA-Seco	669	14,42	2,2	-5,5

Fonte: Própria

As amostras que só sofreram o processo térmico (Tabela 3-7) exibiram uma perda de 15,7% da massa após a secagem. Enquanto o volume diminuiu em 4,5%, levando a uma redução da densidade de 11,6%, com uma média de 633 kg/m³, valores similares áqueles relatados por Moreno *et al.* (2007) para colmos de *B. vulgaris* com teor de umidade de 12%.

Tabela 3-7. Análise estatístico das amostras tratadas termicamente sem infiltração.

Variável	Amostra	Média	DS	CV	Variação (%)
Massa (g)	TT-Natural	3,3	0,17	5,3	
	TT-Seco	2,8	0,11	3,8	-15,7
Volume (cm ³)	TT-Natural	4,6	0,20	4,5	
	TT-Seco	4,4	0,18	4,0	-4,5
Densidade (kg/m ³)	TT-Natural	717	15,53	2,2	
	TT-Seco	634	7,38	1,2	-11,6

Fonte: Própria

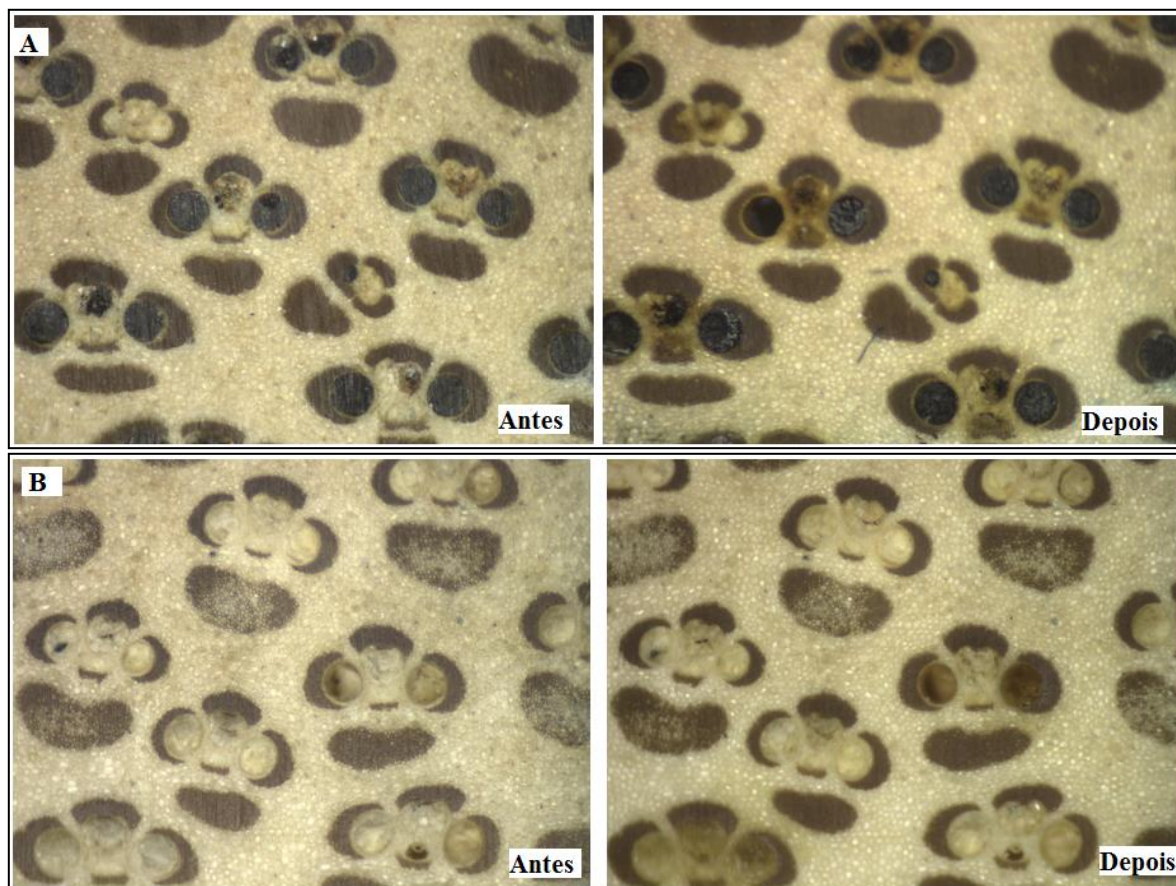
3.3.1.2. Variação do tamanho dos vasos de metaxilema em relação ao tratamento de infiltração com substâncias fixadoras de tecido.

A consequencia direta da modificação dimensional dos corpos de prova com os tratamentos químicos é a contração ou a expansão dos principais tecidos do bambu: vasos, fibras e parênquima. Portanto, como a maior probabilidade de impregnação com polímeros, que é o tema principal deste trabalho, tem sido relatado que pode ser através de, aproximadamente, 10% do volume do colmo, espaço que aportam os vasos condutores, principalmente aqueles situados nas camadas internas do colmo de bambu, a seguir se apresenta a análise da variância do diâmetro de alguns vasos de metaxilema, obtida por meio da análise estatística dos dados obtidos a partir das microfotografias de cortes transversais das amostras, com e sem infiltração das soluções fixadoras de tecidos.

As microfotografias apresentadas na Figura 3-24 correspondem às seções transversais de corpos de prova antes e após os tratamentos químicos. As amostras infiltradas com solução de FAA (Fig. 3-24A) apresentaram uma alteração da coloração da superfície mais intensa do que aquela obtida usando a solução de GA (Fig. 3-24B). Assim, como primeira conclusão,

pode-se inferir que a modificação de cor é uma consequência própria das reações que ocorrem na matriz lignocelulósica, as quais estão relacionadas com a natureza do solvente, como exemplo, pelo baixo pH e pelo elevado poder de desidratação da solução FAA, ou pelas possíveis reações de reticulação causada pelo glutaraldeído.

Figura 3-24. Microfotografias de bambu *B. vulgaris* antes e depois dos tratamentos de infiltração com solução FAA (A) e com solução de glutaraldeído 2,5% (B).



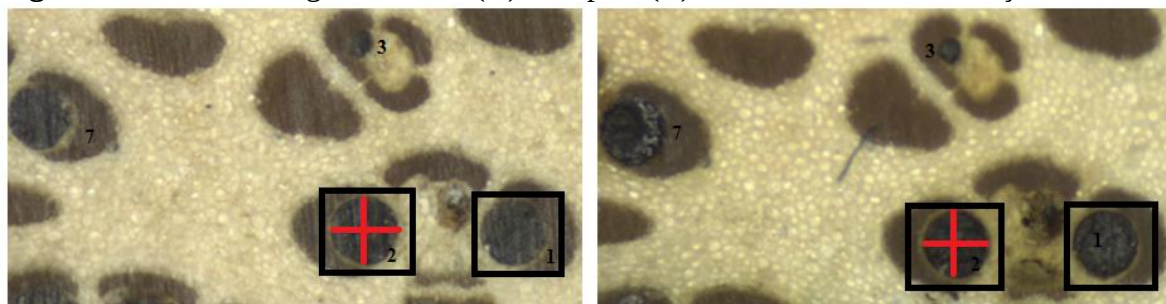
Fonte: Própria

As amostras foram microfotografadas em uma região específica, antes e depois das infiltrações, para ter o mesmo ponto de referência na microfotografia, e poder medir o tamanho do mesmo metaxilema cada vez, e assim conhecer o efeito dos tratamentos especificamente sobre essa região (Tabelas 3-8, 3-9 e 3-10). Alguns vasos de metaxilema foram selecionados e tiveram medidos seus diâmetros nas direções vertical e horizontal (Fig. 3-25), como foi descrito por Sobrinho Júnior *et al.* (2010), utilizando o software próprio do

microscópio Carl Zeiss Axiotech 30. Deve notar-se que esta técnica requer a concentração e a prática na utilização do software, para reduzir-se o erro experimental.

De cada microfotografia foram realizadas 9 medidas horizontais e 9 transversais, sobre os vasos de metaxilema que apresentavam maior nitidez, de modo que para as 9 amostras, foram obtidos 324 dados por cada tratamento, e 162 dados para o grupo de testemunhas térmicas que acompanharam sempre as amostras sem ser infiltradas. Todas as amostras foram fotografadas numa única etapa.

Figura 3-25. Microfotografias antes (A), e depois (B) do tratamento com solução FAA.



Fonte: Própria

Os resultados obtidos para todos os tratamentos mostraram uma distribuição homogênea dos dados (Anexo B), o que pode ser confirmado pela observação dos valores de desvio-padrão da média. Em geral, os resultados não indicam uma tendência clara sobre a variação do tamanho dos vasos, ou seja, foram percebidos aumentos e diminuições aleatórias dentro de cada tratamento. Os resultados obtidos a partir dos tratamentos de infiltração (Tabelas 3-8 e 3-9) indicaram uma maior tendência dos vasos de metaxilema em terem diminuído o diâmetro horizontal (na direção da face tangencial) em relação ao diâmetro vertical (direção radial, da casca para o diafragma), o que pode ser o resultado da interação entre as reações ocorridas sobre todos os tecidos internos infiltrados, feixes, parênquima e fibras, já que a retração foi observada em cada face dos corpos de prova. No entanto, as amostras testemunhas térmicas apresentaram retração no tamanho dos metaxilemas, nas duas direções medidas (Tabela 3-10), o que poderia ser explicado pela hidratação residual nos tecidos que rodeiam os vasos, de forma homogênea em todas as suas direções.

Tabela 3-8. Variação do diâmetro dos vasos de metaxilema com a infiltração de solução de glutaraldeído.

Amostras	Diâmetro horizontal Antes (µm)	Diâmetro horizontal Depois (µm)	Variação (%)	Diâmetro vertical Antes (µm)	Diâmetro vertical Depois (µm)	Variação (%)
BGA1	146,7	149,0	2,2	139,2	143,0	3,0
BGA2	151,1	147,1	-2,3	162,0	157,6	-2,1
BGA3	132,2	138,2	4,7	135,7	133,1	-1,9
BGA4	143,0	139,7	-2,3	137,7	139,2	1,4
BGA5	136,7	138,6	2,6	142,0	142,9	1,1
BGA6	130,2	123,8	-4,0	131,1	130,2	3,0
BGA7	133,3	129,4	-1,5	123,8	127,6	4,2
BGA8	131,2	128,6	-2,0	126,3	135,6	7,6
BGA9	124,6	129,1	4,0	126,9	127,7	0,5

Fonte: Própria- B: bambu, GA: Tratadas com solução. GA a 2,5%

Tabela 3-9. Variação do diâmetro dos vasos de metaxilema com a infiltração de solução FAA.

Amostras	Diâmetro horizontal Antes (µm)	Diâmetro horizontal Depois (µm)	Variação (%)	Diâmetro vertical Antes (µm)	Diâmetro vertical Depois (µm)	Variação (%)
BFAA1	118,2	113,1	-4,3	126,0	116,7	-6,6
BFAA2	130,0	127,8	-1,7	127,7	125,4	-1,5
BFAA3	145,1	143,6	-0,6	147,6	147,8	0,1
BFAA4	133,9	130,9	-1,5	135,7	135,3	0,5
BFAA5	149,3	156,2	4,9	154,7	156,4	1,6
BFAA6	131,1	130,2	0,0	117,1	117,4	1,3
BFAA7	128,2	122,9	-3,7	130,2	130,7	0,4
BFAA8	129,7	128,0	-0,7	131,2	131,8	0,6
BFAA9	133,4	126,0	-5,1	145,7	151,3	4,4

Fonte: Própria- B: bambu, FAA: Tratadas com soln. FAA

Tabela 3-10. Variação do diâmetro dos vasos de metaxilema com o tratamento térmico.

Amostras	Diâmetro horizontal Antes (µm)	Diâmetro horizontal Depois (µm)	Variação (%)	Diâmetro vertical Antes (µm)	Diâmetro vertical Depois (µm)	Variação (%)
BT1	132,7	127,6	-3,3	141,8	137,1	-3,1
BT2	148,4	141,6	-3,9	136,2	134,4	-1,1
BT3	128,1	125,2	-1,9	125,7	125,2	0,3
BT4	122,4	119,3	-2,4	118,9	117,7	-0,6
BT5	133,7	132,7	0,2	140,4	139,3	-0,4
BT6	123,8	121,8	-1,5	123,0	121,6	-0,4
BT7	140,0	138,4	-0,9	133,4	130,8	-1,5
BT8	136,7	138,2	2,5	140,8	134,4	-4,1
BT9	134,6	129,7	-3,0	137,7	133,1	-2,8

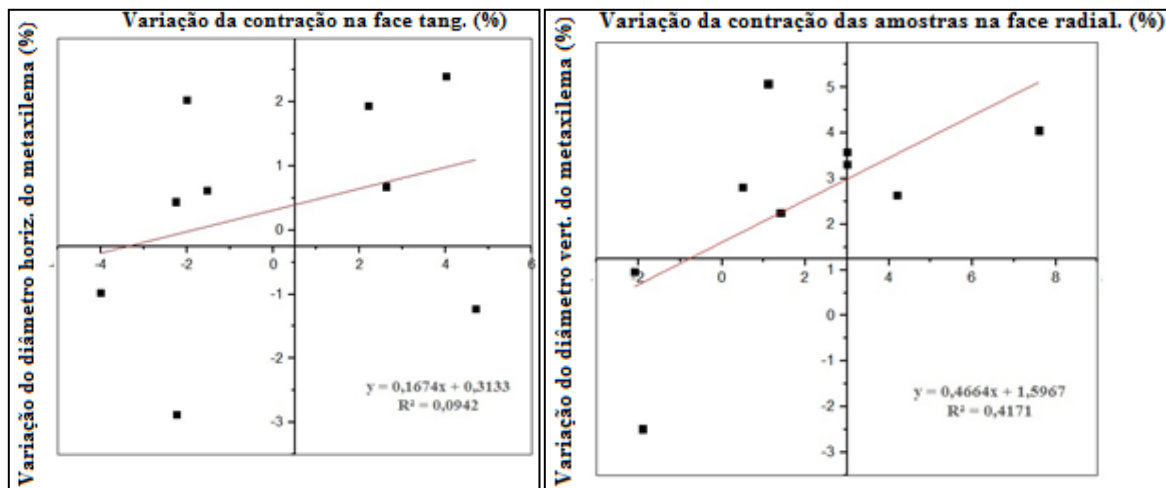
Fonte: Própria- B: bambu, T: amostras testemunha térmica

A comparação entre as medidas da variação percentual dos vasos de metaxilema com relação à variação percentual da contração dos corpos de prova, em cada uma das direções, radial e tangencial, se apresentam nos gráficos 3-26, 3-27 e 3-28. Em geral, os dados obtidos depois da infiltração com as soluções fixadoras não apresentaram tendências significativas na relação entre a variação do metaxilema e a variação na retração, exibindo valores de aumento e diminuição dos vasos aleatoriamente e sem depender da retração. Observou-se que as amostras testemunhas térmicas apresentaram a tendência de ocorrer retração dos vasos com a retração das faces da amostra, embora sem apresentar uma correlação linear entre os valores.

Em resumo, os tratamentos de infiltração com substâncias fixadoras causaram modificações no tamanho dos metaxilemas; no entanto, não foi possível identificar a tendência dos dados, nem se pôde inferir que o tratamento altere diretamente a estrutura do metaxilema, já que a variação do diâmetro do vaso pode ser consequência da alteração do parênquima. Como tentativa, se realizou a análise dos brancos e pretos sobre as microfotografias para identificar o efeito sobre o parênquima, porém, o fato de a modificação da cor com o tratamento, mascarou os resultados, razão pela qual não foram relatadas neste documento.

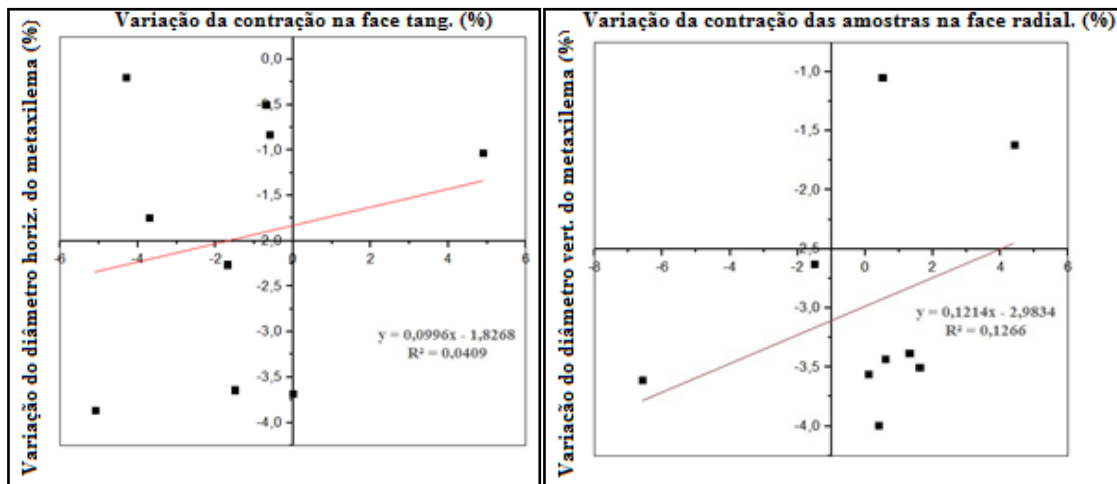
Examinando-se as Figuras 3-26 a 3-28 oriundas das Tabelas 3-7 a 3-9 em função da contração da superfície do corpo de prova, não se encontrou nenhuma correlação entre a variação dos diâmetros do metaxilema com a retração ocorrida nas duas direções, horizontal e vertical.

Figura 3-26. Relação entre a variação do tamanho do metaxilema com a retração da amostra infiltrada com solução GA.



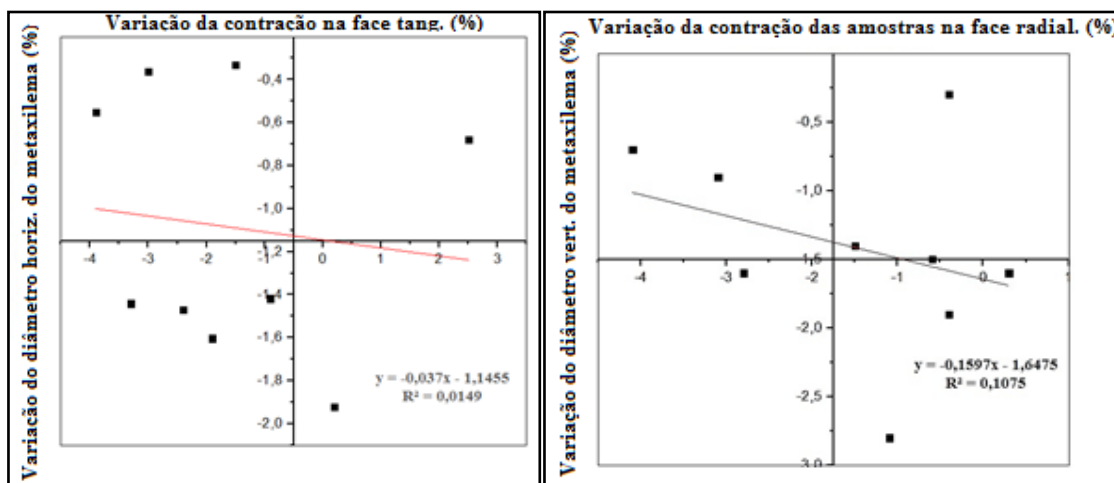
Fonte: Própria

Figura 3-27. Relação entre a variação do tamanho do metaxilema com a retração da amostra infiltrada com solução FAA.



Fonte: Própria

Figura 3-28. Relação entre a variação do tamanho do metaxilema com a retração da amostra utilizada como testemunha térmica.



Fonte: Própria

3.3.2. . Polimerização *in situ* em corpos de prova de bambu

Os primeiros trabalhos publicados no tema de impregnação com polímeros no interior das amostras lignocelulósicas indicaram seu uso em amostras de madeira; no entanto, a importância de implementar o bambu como elemento estrutural tem se mostrado relevante para as pesquisas nesta área dos materiais compósitos.

Os corpos de prova preparados de acordo com a norma ASTM 143-09 e identificados para cada ensaio mecânico (resistência à compressão paralela às fibras, resistência à compressão perpendicular às fibras e resistência à flexão, foram impregnados com as respectivas misturas dos monômeros com o fim de identificar a capacidade de polimerização, tomando como referência a variação dos parâmetros dimensionais, espessura, comprimento e largura, assim como a variação da massa. Na Tabela 3-11 se indicam as identificações utilizadas nas diversas amostras e o processo que foi realizado.

No total se disponibilizaram 10 corpos de prova para cada ensaio. Como já foi mencionado, as amostras foram produzidas em série e identificadas como natural (N), testemunha térmica (T), e aquelas tratadas com soluções FAA e GA. Como pré-tratamento à impregnação se escolheu usar a solução de glutaraldeído, devido ao menor teor de substâncias agressivas ao material vegetal, e à menor modificação sofrida pelo material lignocelulósico de acordo com os resultados preliminares das análises de DRX e FTIR.

Tabela 3-11. Descrição das amostras impregnadas com copolímeros.

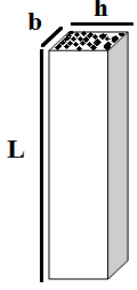
Amostras	Processo
B-SM-Cp B-SM-Cr	Corpos de prova 1:1:4 para ensaio de compressão paralela às fibras (Cp) e compressão perpendicular às fibras (Cr), impregnados com monômeros de estireno e de metacrilato de metila, adaptando a norma ASTM 1413-99, e polimerizados a 55°C durante 12 h.
BGA-SM-Cp BGA-SM-Cr	Corpos de prova 1:1:4 para ensaio de compressão paralela às fibras (Cp) e compressão perpendicular às fibras (Cr), com pre-tratamento de infiltração de glutaraldeído 2,5%, secos a 50°C por 48 h, e logo impregnados com monômeros de estireno e de metacrilato de metila adaptando a norma ASTM 1413-99, e polimerizados a 55°C durante 12 h.
BGA-SMB-Cp BGA-SMB-Cr	Corpos de prova 1:1:4 para ensaio de compressão paralela às fibras (Cp) e compressão perpendicular às fibras (Cr), com pre-tratamento de infiltração de glutaraldeído 2,5%, secados a 50°C por 48 h, e logo impregnados com monômeros de estireno, metacrilato de metila e acrilato de butila, adaptando-se a norma ASTM 1413-99, e polimerizados a 55°C durante 12 h.
B-SM-F	Corpos de prova 1:1:15 para ensaio a flexão, impregnados com monômeros de estireno e de metacrilato de metila, adaptando-se a norma ASTM 1413-99, e polimerizados a 55°C durante 12 h.
BGA-SM-F	Corpos de prova 1:1:15 para ensaio a flexão, com pre-tratamento de infiltração de glutaraldeído 2,5%, secados a 50°C por 48 h, e logo impregnados com monômeros de estireno e de metacrilato de metila, adaptando-se a norma ASTM 1413-99, e polimerizados a 55°C durante 12 h.
BGA-SMB-F	Corpos de prova 1:1:15 para ensaio a flexão, com pre-tratamento de infiltração de glutaraldeído 2,5%, secados a 50°C por 48 h, e logo impregnados com monômeros de estireno, metacrilato de metila e acrilato de butila, adaptando-se a norma ASTM 1413-99, e polimerizados a 55°C durante 12 h.

B:Bambu; **SM:**Copolímero poli(St-co-MMA), **SMB:**Terpolímero poli(St-co-MMA-BuA); **Cp:**Compressão paralela às fibras, **Cr:**Compressão perpendicular às fibras; **F:** Flexão

Os tratamentos térmicos ou químicos causam inchamento e retração nas faces prismáticas dos corpos de prova de bambu, sendo os teores de fibras e de parênquima e a distribuição das fibras os fatores principais que influíram na deformação do corpo de prova, e, portanto, interferiram nas propriedades mecânicas (Osorio *et al.*, 2007b). Tal fato foi observado antes e depois da infiltração ou da secagem das amostras.

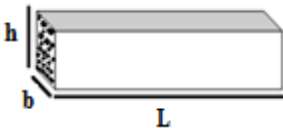
Nas Tabelas 3-12 a 3-14 apresentam-se os valores médios da variação porcentual ao longo da: espessura (h), largura (b) e comprimento (L), assim como do volume (V), da massa (m) e da densidade (d), das amostras impregnadas utilizadas nos ensaios de compressão paralela às fibras, de compressão perpendicular às fibras e de flexão. Os valores obtidos para as amostras, incluindo as testemunhas e os pré-tratamentos de infiltração se apresentam no Anexo C.

Tabela 3-12. Variação porcentual dos parâmetros analisados nas amostras impregnadas com copolímeros para ensaios de compressão paralela às fibras.

Posição do espécimen	Amostra	Parâmetro estatístico	h	b	L	V	m	d
	B-SM-Cp	Média	-4,24	-3,92	-1,45	-9,32	-12,01	-2,97
		σ	0,92	0,53	1,00	1,75	2,10	1,63
		C.V.	21,81	13,46	68,62	18,74	17,53	54,96
	BGA-SM-Cp	Média	2,55	2,27	0,15	5,04	8,17	3,88
		σ	0,79	0,72	0,28	1,43	0,95	1,49
		C.V.	31,02	31,78	183,91	28,43	11,63	38,41
	BGA-SMB-Cp	Média	2,29	2,45	0,36	5,20	10,63	5,17
		σ	0,33	0,84	1,32	1,19	2,42	2,51
		C.V.	14,45	34,37	366,48	22,81	22,77	48,49

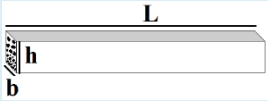
Sendo h: a face radial do corpo de prova, e b: a face tangencial do corpo de prova. Corpo prismático de proporção 1:1:4

Tabela 3-13. Variação porcentual dos parâmetros analisados nas amostras impregnadas com copolímeros para ensaios de compressão perpendicular às fibras.

Posição do espécimen	Amostra	Parâmetro estatístico	h	b	L	V	m	d
	BSM-Cr	Média	-4,13	-4,05	-2,89	-10,67	-12,64	1,09
		σ	0,88	0,98	0,53	1,44	2,56	4,96
		C.V.	21,39	24,21	18,43	13,49	20,25	455,74
	BGA-SM-Cr	Média	3,00	2,09	0,51	5,68	11,18	5,22
		σ	0,51	0,72	0,62	0,87	2,43	2,64
		C.V.	16,99	34,65	121,67	15,30	21,71	50,52
	BGA-SMB-Cr	Média	2,12	1,82	0,28	4,28	11,04	6,55
		σ	0,34	0,72	2,40	2,92	1,30	2,95
		C.V.	16,20	39,77	849,99	68,27	11,77	44,99

Sendo h: a face radial do espécimen, e b: a face tangencial do espécimen. Corpo prismático de proporção 1:1:4

Tabela 3-14. Variação porcentual dos parâmetros analisados nas amostras impregnadas com copolímeros para ensaios de flexão.

Posição do espécimen	Amostra	Parâmetro estatístico	h	b	L	V	m	d
	B-SM-F	Média	-4,68	-4,24	-2,58	-11,05	-13,51	0,65
		σ	2,35	1,50	0,44	3,61	2,50	6,03
		C.V.	50,27	35,47	17,21	32,70	18,51	932,18
	BGA-SM-F	Média	2,75	2,48	0,52	5,01	9,38	4,17
		σ	0,86	0,75	0,29	1,54	2,18	1,70
		C.V.	31,08	30,01	56,14	30,76	23,25	40,76
	BGA-SM-F	Média	1,70	1,62	2,12	5,54	12,12	6,24
		σ	0,43	0,72	0,72	1,49	0,72	0,86
		C.V.	25,44	44,68	34,15	26,86	5,97	13,85

Sendo h: a face radial do corpo de prova, e b: a face tangencial do corpo de prova. Corpo prismático de proporção 1:1:15

Os resultados obtidos indicaram que a impregnação com o copolímero SM, sem pré-tratamento de infiltração com solução GA, causou a retração similares nos corpos de prova nas direções tangencial e radial. No entanto, as amostras com a infiltração de GA apresentaram inchamento, sendo mais elevado na direção radial do que na direção tangencial. O aumento da largura com a utilização dos copolímeros nas amostras pré-tratadas foi inferior a 2,2%, enquanto que as amostras não pré-tratadas apresentaram retração, o que se relaciona com o fato que os monômeros de metacrilato de metila ou de acrilato de butila, polimerizados *in situ* incrementaram a estabilidade dimensional dos corpos de prova ao se empacotarem na parede celular (Runumee *et al.*, 2014), sendo melhorada a impregnação com o pré-tratamento com GA.

Sendo o volume uma grandeza derivada dos dados medidos sobre as faces dos corpos prismáticos, a tendência que este segue se mostra influenciada pela variação das arestas das amostras. De acordo com os resultados, o volume aumentou nas amostras pré-tratadas com GA antes da impregnação e diminuiu com a impregnação do SM sem uma prévia infiltração de GA. O aumento do volume situou-se entre 4,28% e 5,68%.

A quantidade de polímero impregnado, denotado pelo aumento da massa das amostras após da polimerização *in situ*, situou-se entre 8,17% e 12,12%; no entanto, cumpre ressaltar

que as amostras impregnadas sem infiltração prévia apresentaram perda de massa. Então, de acordo com os resultados obtidos, se evidencia a necessidade de serem realizadas infiltrações com solução GA com o fim de proceder-se a uma limpeza dentro do material vegetal antes da impregnação. Isto porque os monômeros causaram lixiviação no material, de acordo com a cor observada na mistura residual dos monômeros impregnados. Por referências bibliográficas, se sabe que para penetrar no bambu, os monômeros devem passar pelas pequenas aberturas que bordeiam as membranas, motivo pelo qual, as misturas poliméricas devem ser de baixo peso molecular, e além disso, o material vegetal deve ter o teor de umidade inferior a 12% para permitir a polimerização (Liese, 1994).

A densidade das amostras depende dos processos de infiltração e impregnação aos quais elas foram submetidas. Os valores encontrados para as amostras impregnadas com prévia infiltração indicaram um aumento superior a 3,6 %, sem apresentar diferenças significativas entre os resultados obtidos para os copolímeros SM e SMB. O tamanho da amostra não foi um parâmetro de diferenciação para a variação da densidade, e a ausência de pré-tratamento indicou uma diminuição da densidade, como destacou Baysal *et al.* (2007), ao indicaram que os pré-tratamentos realizados nas amostras melhoraram a impregnação com resinas e aumentaram os valores de resistência mecânica e a durabilidade dos corpos de prova de madeira.

Em conclusão, a infiltração com solução GA a 2,5% e a subsequente impregnação com os copolímeros SM e SMB, aumentou a massa e o volume das amostras de bambu, indicando a probabilidade do que o material polimérico ficou alojado no interior delas. Embora os valores obtidos sejam relativamente baixos, deve considerar-se que no processo de infiltração dos monômeros ocorre perda parcial da massa original do bambu por lixiviação de produtos no interior das amostras.

3.3.3. *Propriedades Mecânicas*

A análise do efeito da impregnação com polímeros sobre as propriedades mecânicas do *B. vulgaris* é o objetivo principal deste trabalho, por isso, com o fim de obter maior controle sobre as variáveis implicadas, como já foi explicado no início deste capítulo, foram utilizadas pequenas amostras para aumentar a reprodutibilidade dos resultados, baseados em medidas estatísticas como o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

O uso de pequenas amostras de bambu em ensaios mecânicos foi baseado na norma ASTM D143-09, que trata sobre as propriedades mecânicas em pequenas amostras de madeira. Os resultados obtidos têm relatado valores próximos àqueles encontrados empregando-se os corpos de prova dos colmos inteiros, e a alta correlação desses resultados tem sido um fator influente na aplicação dessa norma durante os últimos anos (Abang. 1984, Osorio. 2007b e Guimarães. 2013).

As espécies biológicas, tais como o bambu, são sistemas complexos com um grande número de variáveis que podem ter impacto nos resultados das análises. Liese (1994) indicou que a estrutura anatômica, a idade e o tempo decorrido após do corte mantêm uma ampla relação com as propriedades físicas e mecânicas do bambu. Então, para reduzir os erros associados com a natureza da amostragem, é comum que nas investigações que envolvam tais materiais, baseiem seus resultados estatísticos em centenas de amostras testadas, a fim de encontrar uma tendência matemática que apoie ou elimine os dados anômalos. No entanto, como o delineamento experimental assumido neste trabalho foi constituído por um total de 10 amostras para cada teste, de acordo com Gómez-Biedma. (2001), foi aconselhável evitar a utilização de métodos estatísticos, tais como a Q de Dixon ou outro semelhante para remover valores atípicos. Portanto, dada a pequena população de dados, exige-se um controle mais rigoroso das variáveis que possam afetar a normalidade das amostras, para evitar assim a eliminação de dados anormais.

Os corpos de prova utilizados nas 2 primeiras das 4 vezes que se repetiu o procedimento de infiltração e impregnação no *B. vulgaris*, foram pequenos espécimens prismáticos com nó e sem nó, retirados de diferentes colmos, com o mesmo tempo decorrido após o corte e coletados da mesma região geográfica. No entanto, os coeficientes de variação

obtidos nessas primeiras experiências se encontraram entre 400 e 3500, como consequência das variações negativas e positivas que apresentavam as amostras logo após serem submetidas ao tratamento químico, o que repercutia na alta dispersão dos dados. Portanto, se optou por elaborar os corpos de prova da mesma parte do colmo, como se descreveu na metodologia, mantendo um estrito controle sobre as seguintes variáveis: elaboração das amostras, temperatura, armazenamento, tempo e ensaios de caracterização, ajustando todo o processo para um único cronograma de produção em linha, com o que se almejava diminuir a exagerada variação dos dados.

3.3.3.1. Ensaio de compressão paralela às fibras (Cp)

Os ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados sobre 10 corpos de prova de cada grupo em estudo. As informações das amostras infiltradas e impregnadas com polímeros se apresentam no anexo C.

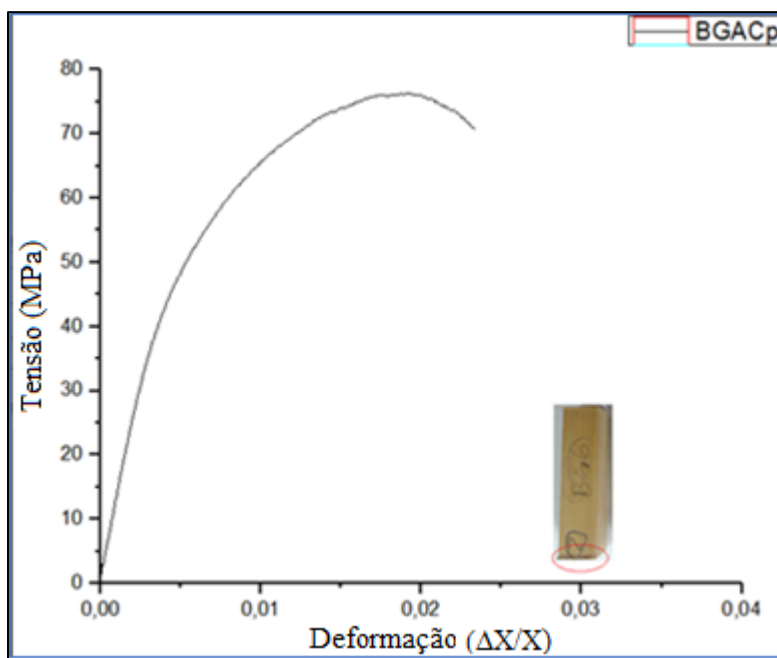
A resistência à compressão paralela às fibras (f_{cp}) foi calculada com base na Equação 3-11, onde P_{max} refere-se à força máxima medida pelo aparelho de ensaios, e A , a área da seção transversal do corpo de prova. Como uma medida adicional, foi calculada a tensão no limite de proporcionalidade (σ_{LE}), considerado como sendo o 75% da resistência máxima em compressão (Takeuchi, 2014).

$$f_c = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Eq 3-11}$$

O comportamento típico dos corpos de prova ensaiados em compressão é mostrado na Figura 3-29. A curva refere-se à amostra BGACp6 do grupo das amostras infiltradas com solução GA a 2,5%. Observou-se que a parte externa do corpo de prova, a que apresenta a maior quantidade de fibras, exerce a principal oposição à carga, devido a sua maior rigidez comparada com a região interna (menor quantidade de fibras); uma vez atingida a máxima resistência, em geral as amostras exibiram separação das fibras na extremidade superior e inferior da face exterior. De acordo com Arce (1995), esse comportamento das fibras está

relacionado com as ligações químicas que lhe compõem, e explica além disso a ausência das células radiais enfraquece as ligações cruzadas, de modo que, após o aumento das tensões tangenciais devidas à carga na direção longitudinal, acontece uma inevitável ruptura das fibras. Não foi observado deslizamento dos corpos de prova nos pratos da máquina, evidenciando que o ensaio foi conduzido adequadamente.

Figura 3-29. Curva típica Tensão-Deformação no ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: Própria

O módulo de elasticidade foi obtido diretamente a partir das curvas de Tensão-Deformação do ensaio de compressão paralela às fibras, calculando-se a inclinação aproximada da curva no intervalo entre 20% e 75% da carga máxima. Os resultados das amostras denominados de naturais são apresentados na Tabela 3-15, e os demais resultados obtidos são apresentados no Anexo D. Deve ser ressaltado que os valores dos módulos de elasticidade apresentados foram ligeiramente inferiores aos dos reais, porque o deslocamento medido está se referindo ao deslocamento dos pratos da prensa. Para se obter maior precisão, deveria ter sido instalado um *strain gage* no próprio corpo de prova.

Tabela 3-15. Parâmetros de caracterização do ensaio de resistência a compressão paralela às fibras (Cp) para as amostras de bambu em sua condição natural.

Amostra	Resistência	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de Umidade
	f_{c_p}	σ_{LE}	E	ρ	C. H.
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BN-Cp1	53,78	40,34	5,39	615	15,72
BN-Cp2	58,90	44,18	5,20	664	10,92
BN-Cp3	54,90	41,18	5,02	649	13,04
BN-Cp4	54,77	41,08	6,51	637	13,43
BN-Cp5	57,35	43,01	6,46	678	11,46
BN-Cp6	51,01	38,26	8,70	610	14,60
BN-Cp7	64,61	48,46	9,29	692	9,97
BN-Cp8	57,57	43,18	7,97	649	13,32
BN-Cp9	54,37	40,78	7,59	654	13,29
BN-Cp10	65,99	49,49	9,46	683	9,39
Média	56,47	42,36	6,65	649	12,73
σ	4,38	3,29	1,71	31	2,06
C.V.	7,76	7,76	25,73	5	16,20

Fonte: Própria- B: Bambu, N: amostra natural

Os valores médios dos resultados obtidos para todos os grupos em estudo são apresentados na Tabela 3-16, junto com seus respectivos valores de desvio-padrão (σ) e coeficiente de variação (C.V.). Os resultados correspondentes à resistência apresentaram baixos valores de coeficientes de variação, o que indica a homogeneidade da população de dados avaliados. No entanto, os resultados correspondente ao módulo de elasticidade das amostras naturais apresentaram maior valor de coeficiente de variação ao comparar-se todos os grupos, o que sugere que com os tratamentos térmicos e químicos diminuem a dispersão dos resultados. Devido ao número de amostras no grupo, não se realizou a eliminação de dados atípicos, para manter a análise sobre a complexidade própria da natureza das amostras.

Tabela 3-16. Parâmetros avaliados durante os ensaios a compressão paralela às fibras (Cp).

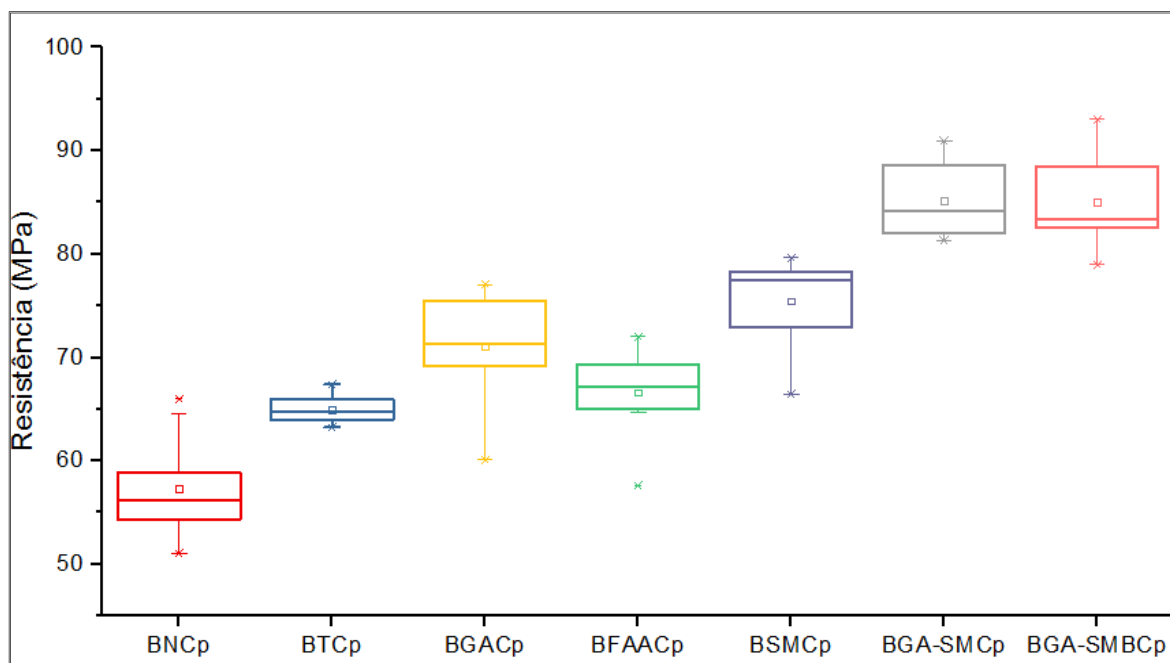
Amostra	Medida Estatística	Resistência	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
		f_{c_p} (MPa)	σ_{LE} (MPa)	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	C. H. (%)
BN-Cp	Média	56,5	42,4	6,7	649	12,51
	σ	4,4	3,3	1,77	31	2,02
	C.V.	7,8	7,8	25,7	5	16,174
BT-Cp	Média	65,0	48,7	7,8	650	9,40
	σ	1,3	1,0	1,1	13,8	2,15
	C.V.	2,0	2,1	14,3	2,13	22,85
BFAA-Cp	Média	66,6	49,9	6,6	633	12,98
	σ	4,0	3,0	0,7	38,2	2,26
	C.V.	5,9	5,9	11,2	6,0	17,38
BGA-Cp	Média	71,1	53,3	7,8	676	11,25
	σ	4,9	3,7	0,8	16,05	1,99
	C.V.	6,9	6,9	9,6	2,37	17,69
BSM-Cp	Média	75,5	56,6	8,7	667	10,44
	σ	4,6	3,4	1,2	38,1	2,20
	C.V.	6,0	6,0	13,6	5,7	21,04
BGA-SM-Cp	Média	85,2	63,9	11,1	651	10,82
	σ	3,6	2,7	1,7	29,7	0,92
	C.V.	6,9	6,9	9,6	2,37	8,54
BGA-SMB-Cp	Média	85,0	63,8	10,8	629	12,45
	σ	4,4	3,3	1,4	28,5	1,33
	C.V.	5,2	5,2	12,5	4,5	10,77

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução GA 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cp:compressão paralela às fibras.

Os gráficos de caixas apresentados na Figura 3-30 permitem identificar os efeitos acarretados pelos tratamentos efetuados sobre as amostras. Conforme foi mostrado, o tratamento de secagem aumenta os valores de resistência à compressão paralela às fibras. Os tratamentos de infiltração também proporcionaram a obtenção de valores mais elevados de f_{c_p} em relação às amostras naturais, sendo mais significativa com a utilização da solução de GA. Os valores mais elevados de resistência foram relatados para as amostras pré-tratadas com a solução de GA e impregnadas com polímeros, sem apresentar diferenças significativas

entre as médias ao serem utilizados poli(St-co-MMA) ou poli(St-co-MMA-BuA), mas observando-se uma maior dispersão dos valores com o uso do terpolímero.

Figura 3-30. Diagramas de caixa dos valores de resistência (f_{cp}) obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras.



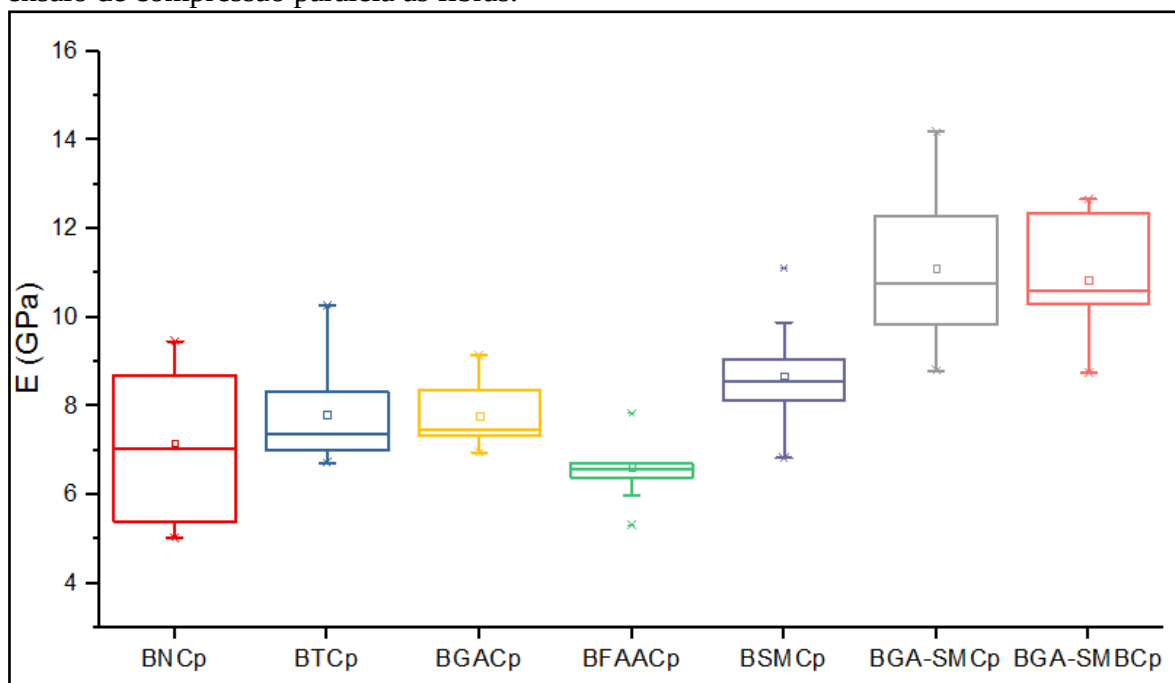
Fonte: Própria

Amostras da mesma espécie de bambu foram ensaiadas na Quênia e apresentaram densidade de 590 Kg/m^3 , exibindo valores de f_{cp} de $56,7 \text{ MPa}$, sem nó e $49,9 \text{ MPa}$, com nó (Mbuge, 2000). Corpos de prova cilíndricos, elaborados em relação 1:1 diâmetro:altura, provenientes dos colmos da mesma espécie utilizada neste trabalho, secados em condições ambientais, propiciaram resistência média em compressão paralela às fibras em $47,0 \text{ MPa}$ (Sobrinho *et al.*, 2012), enquanto que alguns corpos de prova cilíndricos da mesma espécie de bambu, com teor de umidade de $14,25\%$, exibiram uma resistência máxima em compressão paralela às fibras de $54,8 \text{ MPa}$ (Gomes, 2017). Em comparação com os resultados anteriores, o uso de pequenas amostras, adaptado neste trabalho, propiciaram a obtenção de valores de resistência à compressão paralela às fibras entre $51,0$ e $66,0 \text{ MPa}$, com teor de umidade de $14,60\%$ e $9,39\%$, respectivamente. O valor médio de resistência a compressão paralela às fibras encontrado foi $56,4 \text{ MPa}$, o qual mostra uma variação de, aproximadamente, 3% com respeito à amostra cilíndrica. Dixon e Gibson (2014) reportaram

que a diferença entre as resistências de pequenas amostras e de corpos de prova cilíndricos estaria por volta de 7%.

Os valores de módulo de elasticidade (MOE) em compressão obtidos pelo ensaio de compressão paralela às fibras são apresentados no Anexo D. Nos gráficos de caixa da Figura 3-31, se infere que os tratamentos exerceram efeito sobre esse parâmetro avaliado. Em comparação com as amostras de referência, denominada de natural, se observa que o processo de secagem, a infiltração com as soluções fixadoras FAA e GA, e incluindo a impregnação com o copolímero SM sem infiltração prévia de soluções fixadoras, não afetaram significativamente os valores de MOE, enquanto que o processo de infiltração com a solução GA e impregnação de polímeros, SM e SMB, aumentaram o valor do MOE, sem apresentar diferenças significativas entre as médias.

Figura 3-31. Diagramas de caixa dos valores de módulo de elasticidade (E) obtidos por ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: Própria

A variação percentual dos resultados de resistência de compressão paralela às fibras máxima e do MOE em comparação com as amostras sem tratamento, denominados de amostra natural, se apresentam na Tabela 3-17. O tratamento térmico propiciou um aumento de 13,33% da resistência máxima em compressão paralela às fibras o que indicou que a

modificação da composição do material lignocelulósico incrementou a resistência mecânica das fibras. Também se observou que o único tratamento que reduziu o valor da resistência e do módulo de elasticidade em compressão foi a infiltração com solução FAA. Os resultados de resistência à compressão paralela às fibras obtidos para os corpos de prova infiltrados com GA e impregnados com SM e SMB, foram próximos de 48%, valor que contém o incremento causado pelo processo térmico e químico da infiltração de GA. Dos resultados também se infere que, o uso do acrilato de butila não aportou melhora ao valor do módulo em compressão.

Tabela 3-17. Variação percentual em relação aos espécimens de referência em sua condição natural do ensaio de compressão paralela às fibras (Cp).

Amostra	Resistência Max.	Limite de Elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de Umidade
BT-Cp	13,33	13,33	9,10	-0,49	-24,83
BGA-Cp	23,97	23,97	8,74	3,58	3,75
BFAA-Cp	16,17	16,17	-7,44	-3,02	-10,12
BSM-Cp	31,68	31,68	21,33	2,42	-16,54
BGA-SM-Cp	48,56	48,56	55,23	-0,39	-13,54
BGA-SMB-Cp	48,33	48,33	51,52	-3,72	-0,48

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cp: compressão paralela às fibras.

Embora seja analisada a variação da densidade e do teor de umidade neste trabalho, cabe mencionar que tais características dependem dos tratamentos efetuados nas amostras, assim que para as amostras naturais e as testemunhas térmicas esses valores mostram uma relação direta com as propriedades mecânicas, enquanto que nos demais grupos em estudo só foram publicados esses apenas como informação e como parte da análise da correlação das variáveis mecânicas com a modificação causada pelos tratamentos.

Em amostras Jelutong (*Dyera costulata*), Berbulan (*Endospermum dia- denum*), Batai (*Paraserianthes moluccana*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*), and Pulai (*Alstonia pneumatophora*), tem sido publicado que os tratamentos químicos, por exemplo, com soluções alcalinas a 15%, aumentam a resistência à compressão paralela às fibras em mais de 20% e o módulo de elasticidade em mais de 7%, enquanto que uma subsequente impregnação com poli-(St-co-MMA) incrementa esses valores em 66% e 48%,

respetivamente (Saiful *et al.*, 2012). Também, em amostras de Pinho (*Pinus silvestris*), a polimerização *in situ* utilizando monômeros de estireno e de metacrilato de metila, aumenta a resistência à compressão paralela às fibras das amostras entre 10-44% e do MOE entre 6-24%. No entanto, a impregnação com polímeros em pequenas amostras de bambu não tem sido estudada, exceto em uma outra tese publicada pela autora deste trabalho, onde se estudou a espécie de bambu *Guadua angustifolia* da Colômbia. Os resultados obtidos para essa espécie mantiveram a mesma tendência quanto ao aumento da resistência à compressão paralela às fibras, porém com resultados mais elevados de resistência máxima, chegando a propiciar aumentos próximos de 70%, enquanto que o MOE aumentou em 41%.

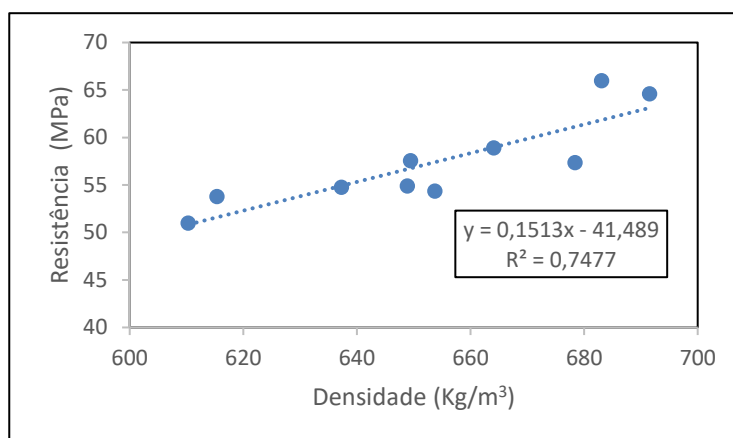
A densidade do bambu está intimamente relacionada com o teor dos feixes vasculares, do tecido circundante e da distribuição das fibras, de modo que a organização morfológica da espécie tem influência sobre suas propriedades mecânicas. Os valores de densidade aparente dos corpos de prova foram calculados utilizando-se a Equação 3-12:

$$Densidade = \frac{Massa}{Volume} \quad \text{Eq.3-12}$$

Tem sido destacada uma alta co-relação linear entre o valor da densidade com a resistência mecânica das fibras do bambu *G. angustifolia kunth* (Tommy *et al.*, 2004, Osorio *et al.*, 2005 e Takeuchi., 2014). Na Figura 3-32 apresenta-se o gráfico que representa a linearidade dos valores entre a resistência a compressão paralela às fibras e a densidade das denominadas de natural, àquelas utilizadas como referência na comparação dos resultados obtidos com os tratamentos térmicos e químicos. No Anexo D se expõem os gráficos referentes a cada grupo de amostras, organizados por tratamento.

Em geral, os resultados indicaram a tendência de aumentar a f_{c_p} com o aumento da densidade. Embora os coeficientes de linearidade tenham sido baixos, inferiores a 0,85 (Tabela 3-18), não foram observadas diferenças significativas entre o valor obtido para o grupo de referência e os outros em estudo. A análise gráfica permitiu ter um parâmetro de avaliação extra entre o tratamento e o ensaio mecânico.

Figura 3-32. Resistência a compressão paralela às fibras em função da densidade.



Fonte: Própria

Tabela 3-18. Fatores de linearidade dos gráficos de resistência à compressão paralela às fibras (f_{cp}) em função da densidade.

Amostra	R ²	M	B
BN-Cp	0,74	0,15	-41,48
BT-Cp	0,82	0,0877	7,96
BGA-Cp	0,73	0,262	-106,82
BFAA-Cp	0,80	0,093	7,87
BSM-Cp	0,70	0,100	8,38
BGA-SM-Cp	0,76	0,100	16,66
BGA-SMB-Cp	0,83	0,141	-3,9

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução de GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cp: compressão paralela às fibras.

Outro fator que afeta a resistência à compressão paralela às fibras dos espécimens do bambu é o teor de umidade. No Anexo D se apresentam os gráficos com os correspondentes parâmetros de correlação linear, sendo que baixos valores de teor de umidade apresentam valores de resistência à compressão paralela às fibras mais elevados. Como mostrado na Tabela 3-19, cada tratamento afeta o teor de umidade de maneira diferente. Em geral, os tratamentos químicos exibiram uma baixa linearidade, o que permite inferir que o teor de umidade das amostras tratadas foi influenciado pelas modificações causadas pelo tratamento, por exemplo, o teor de umidade calculado para as amostras impregnadas de polímeros, está mascarado pelo teor de polímero que contem a amostra. A tendência dos gráficos foi a de apresentar uma tangente negativa (Fig. 3-33), o que era esperado tendo em conta que a resistência mecânica diminui com o aumento do teor de umidade na faixa estudada.

Figura 3-33. Resistência a compressão paralela às fibras em função do teor de umidade

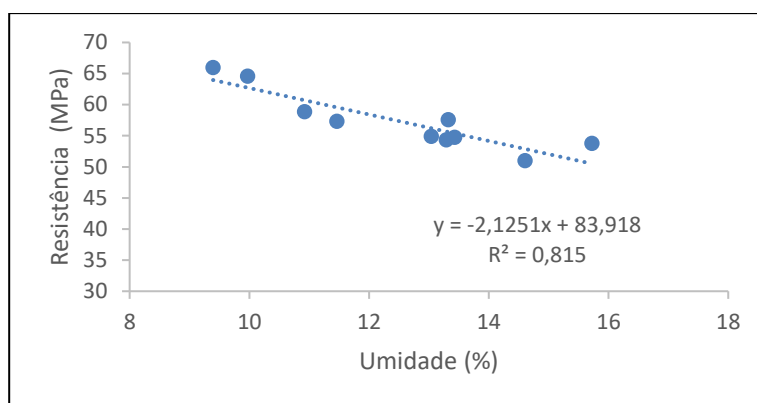


Tabela 3-19. Fatores de linearidade dos gráficos de resistência em função do teor de umidade nas amostras ensaiadas em compressão paralela às fibras.

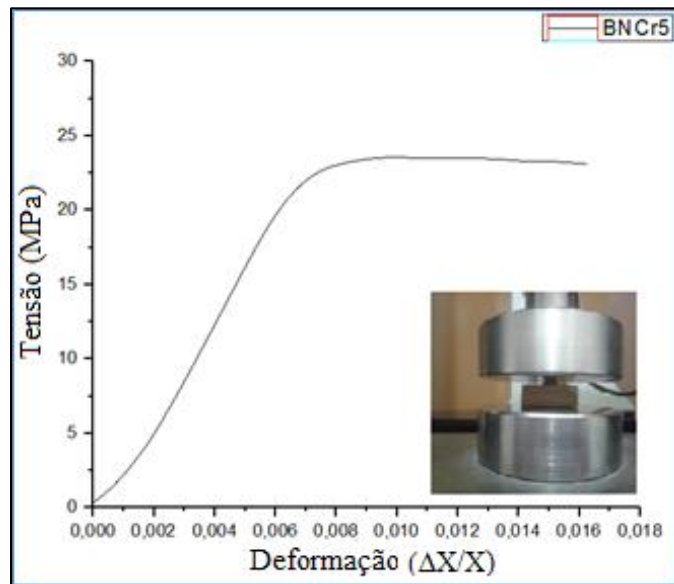
Amostra	R ²	m	b
BN-Cp	0,81	-2,12	83,92
BT-Cp	0,55	-0,45	69,20
BGA-Cp	0,34	-1,27	87,54
BFAA-Cp	0,26	-1,02	78,12
BSM-Cp	0,64	-1,66	92,90
BGA-SM-Cp	0,64	-0,78	93,37
BGA-SMB-Cp	0,39	-2,10	111,18

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Soln. Glutaraldeído 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cp: compressão paralela às fibras. R²: coeficiente de correlação linear, m:inclinação, b:ponto de corte.

3.3.3.2. Ensaio de compressão perpendicular às fibras

Os trabalhos que se referem às propriedades mecânicas do bambu na direção radial são escassos. No entanto, tendo em conta a informação que se pode obter para verificar o efeito da impregnação no material lignocelulósico, esse ensaio foi realizado neste trabalho. O gráfico típico do comportamento de uma amostra do grupo denominado de natural se apresenta na Figura 3-34. Observou-se que os valores encontrados chegaram a ser menores que 50% dos valores da resistência a compressão paralela às fibras. Na Tabela 3-20 se apresentam os parâmetros estudados nas amostras naturais (N), e os demais se exibem no Anexo F.

Figura 3-34. Curva de tensão contra deformação durante o ensaio de compressão perpendicular às fibras.



Fonte: Própria

Tabela 3-20. Parâmetros de caracterização do ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras para as amostras denominadas de natural.

Amostra	Resistência Max.	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
	f_{cr}	σ_{LE}	E	ρ	C. H.
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(kg/m ³)	(%)
BN-Cr1	24,33	18,25	2,91	628	11,10
BN-Cr2	25,02	18,77	4,14	646	11,21
BN-Cr3	19,88	14,91	2,14	603	11,56
BN-Cr4	23,0	17,25	4,08	615	12,50
BN-Cr5	23,29	17,47	3,77	629	10,76
BN-Cr6	18,52	13,89	2,48	620	13,73
BN-Cr7	21,69	16,27	2,84	600	13,28
BN-Cr8	23,19	17,39	4,51	643	11,17
BN-Cr9	23,58	17,69	4,18	620	10,81
BN-Cr10	24,19	18,14	2,83	625	13,94
Média	22,67	17,00	3,39	622,85	12,01
σ	2,06	1,54	0,84	14,74	1,24
C.V.	9,08	9,08	24,65	2,37	10,36

Fonte: Própria- B: Bambu, Cr: compressão perpendicular às fibras

A análise estatística exibiu baixos valores de coeficiente de variação para os diferentes grupos (Tabela 3-21), a pesar do pequeno número de amostras analisadas, o qual serve como parâmetro de avaliação da metodologia seguida neste trabalho, já que a dispersão dos dados não foi significativa.

Tabela 3-21. Parâmetros avaliados durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras (Cr).

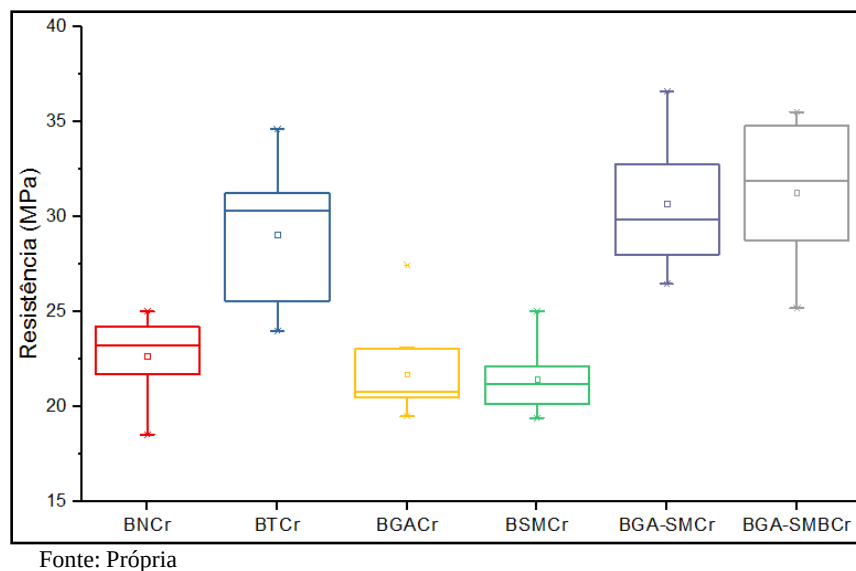
Amostra	Medida Estatística	Resistência Max.	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
		f_{cr} (MPa)	σ_{LE} (MPa)	E (GPa)	ρ (Kg/m ³)	C. H. (%)
BN-Cr	Média	22,67	17,00	3,39	622,85	12,01
	σ	2,06	1,54	0,84	14,74	1,24
	C.V.	9,08	9,08	24,65	2,37	10,36
BT-Cr	Média	29,04	21,78	3,60	628,75	11,74
	σ	3,54	2,65	0,91	24,38	0,72
	C.V.	12,18	12,18	25,33	3,88	6,12
BGA-Cr	Média	21,69	16,27	2,63	647,37	11,71
	σ	2,35	1,76	0,83	14,66	1,42
	C.V.	10,81	10,81	31,42	2,26	12,11
BSM-Cr	Média	21,43	16,07	3,12	640,14	12,31
	σ	1,78	1,33	0,83	8,44	3,08
	C.V.	8,30	8,30	26,71	1,32	25,01
BGA-SM-Cr	Média	30,68	23,01	3,55	646,52	12,68
	σ	3,45	2,59	0,37	17,90	1,02
	C.V.	11,26	11,26	10,49	2,77	8,08
BGA-SMB-Cr	Média	31,26	23,45	3,91	656,26	10,84
	σ	3,57	2,67	0,39	21,05	1,37
	C.V.	11,40	11,40	9,93	3,21	12,68

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução de GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cr: compressão perpendicular às fibras.

A falha dos corpos de prova ocorre por esmagamento dos vasos pertencentes aos feixes condutores do bambu, segundo o pode-ser pela análise através de MEV, em amostras da espécie *Moso Phyllostachys Pubescens*, tendo os autores relatado a resistência à compressão perpendicular às fibras próxima de 25 MPa (Dixon e Gibson, 2014). Os tratamentos térmicos e químicos geraram marcadas diferenças nos valores de resistência de

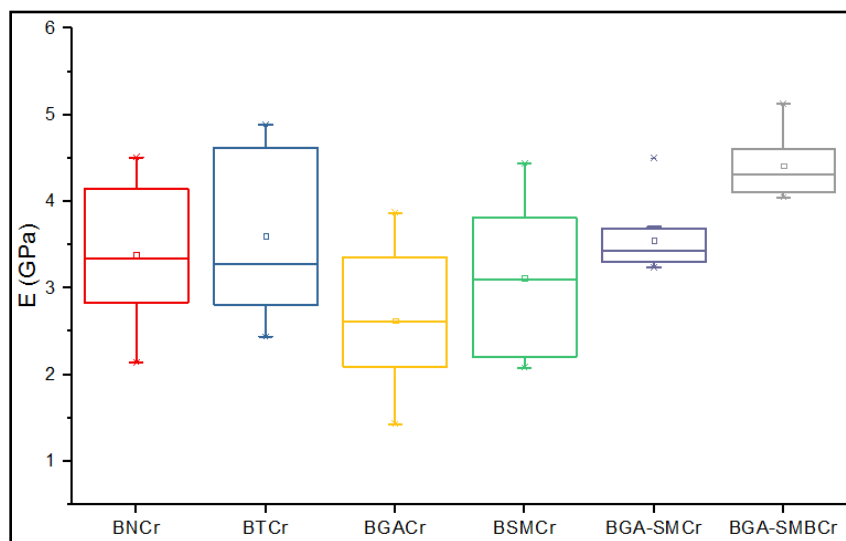
compressão perpendicular às fibras. Na Figura 3-35 apresenta-se os resultados de resistência máxima à compressão perpendicular às fibras agrupados de acordo ao tratamento. Observa-se que a dispersão dos dados diminuiu com as infiltrações da solução GA e com a impregnação de SM sem pré-tratamento, o que pode dever-se à limpeza por lixiviação do material lignocelulósico. No entanto a modificação causada pelos polímeros no interior das amostras, aumentou a dispersão dos dados.

Figura 3-35. Diagramas de caixa dos valores de resistência (f_{cr}) obtidos no ensaio de compressão perpendicular às fibras



Os valores de módulo de elasticidade (Fig. 3-36) obtidos para as amostras foram muito menores do que àqueles obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras, o que já era esperado devido à anisotropia do bambu, e ao fato de a interrupção da absorção de energia deformante por causa do espaço vazio dos feixes.

Figura 3-36. Diagramas de caixa dos valores de módulo de elasticidade obtidos por ensaio de compressão perpendicular às fibras



Fonte: Própria

Com o aquecimento na estufa, os corpos de prova apresentaram aumento da resistência de compressão perpendicular às fibras (Tabela 3-22), enquanto que as infiltrações com solução GA ou com a mistura dos monômeros SM, a reduziram. A impregnação com copolímeros posterior à infiltração de solução GA aumentou tanto a f_{cr} , como o valor do módulo de elasticidade em relação à amostra de referência. Dos resultados pode-se inferir que os copolímeros no interior do material vegetal agem como agente plastificante, especialmente tendo em conta os valores das amostras impregnadas com a mistura de SMB.

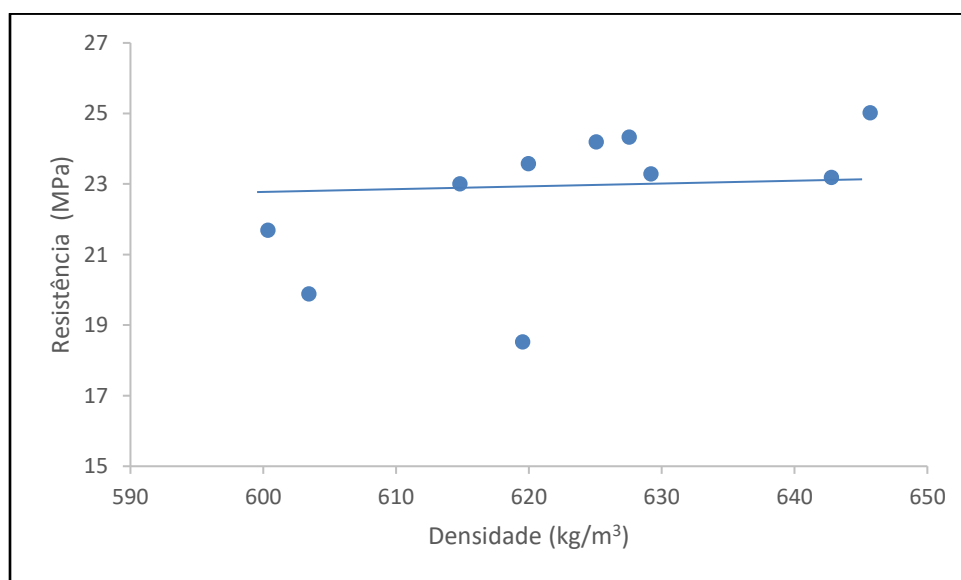
Tabela 3-22. Variação porcentual em relação aos espécimes de referência em sua condição natural do ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Amostra	Resistência Max.	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
	f_{cr}	σ_{LE}	E	ρ	C. H.
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(kg/m ³)	(%)
BT-Cr	28,09	28,09	6,35	0,95	-2,22
BGA-Cr	-4,31	-4,31	-22,51	3,94	-2,44
BSM-Cr	-5,45	-5,45	-8,02	2,78	2,52
BGA-SM-Cr	35,34	35,34	4,85	3,80	5,61
BGA-SMB-Cr	37,90	37,90	15,47	5,36	-9,71

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução de GA a2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cr: compressão perpendicular às fibras.

Em geral, os resultados indicaram a tendência de aumentar a f_{cr} com o aumento da densidade (Fig. 3-37). Dixon e Gibson, (2014) chegaram a uma conclusão semelhante, ou seja, que a variação da resistência à compressão perpendicular às fibras com a densidade é muito pequena. No Anexo F se exibem os gráficos que relacionam a tensão à compressão perpendicular às fibras com a densidade. Como resumo, na Tabela 3-23 se apresentam os valores dos coeficientes de relação linear, que como se observa passam de ser muito baixos para as amostras, natural e testemunhas térmicas, até chegar a valores próximos a 0,8 com as impregnações dos polímeros.

Figura 3-37. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras na condição natural.



Fonte: Própria

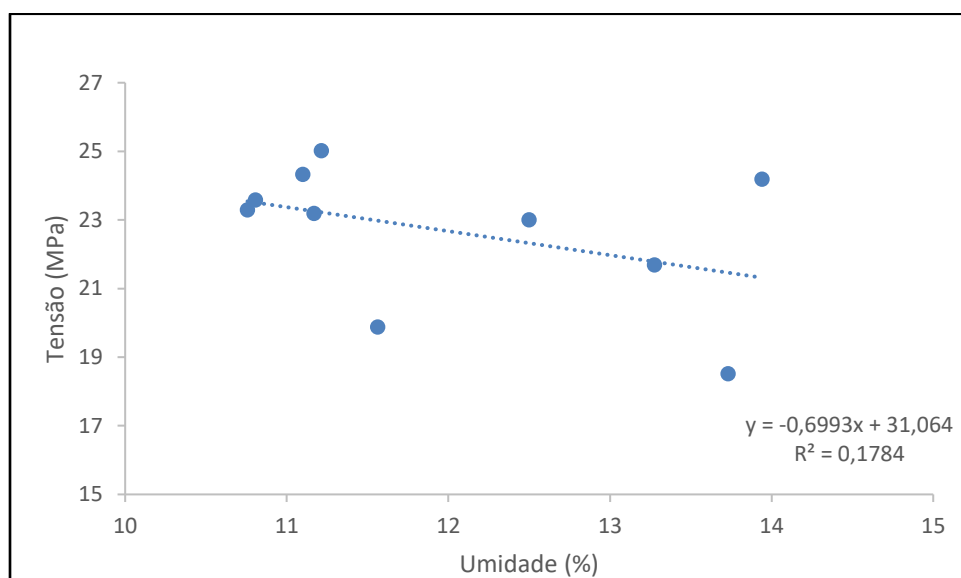
Tabela 3-23. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função da densidade nas amostras ensaiadas à compressão perpendicular às fibras.

Amostra	Densidade (kg/m³)	R²	m	b
BN-Cr	640	0,36	0,084	-29,55
BT-Cr	629	0,43	0,095	-30,69
BGA-Cr	647	0,50	0,113	-51,81
BSM-Cr	640	0,63	0,168	-86,21
BGA-SM-Cr	647	0,64	0,155	-69,44
BGA-SMB-Cr	656	0,76	0,147	-65,66

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Soln. Glutaraldeído 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cr: compressão perpendicular às fibras. R²: coeficiente de correlação linear, m:inclinação, b:ponto de corte

A tendência dos gráficos de resistência à compressão perpendicular às fibras em função do teor de umidade das amostras natural se apresenta na Figura 3-33, enquanto os outros gráficos podem se observar no anexo F. As amostras, natural e testemunhas térmicas, tem apresentado valores de coeficientes de relação linear muito baixos, o que indicam que os valores de resistência para esses grupos de amostras permanecem quase constantes na faixa de teor de umidade estudadas. No entanto, os tratamentos químicos aumentaram os valores do coeficiente linear, R^2 (Tabela 3-24), o que pode significar que a modificação do material lignocelulósico influencia o que é determinado como teor de umidade, é dizer a perda de massa a 105°C em relação à amostra em equilíbrio de umidade.

Figura 3-38. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do teor de umidade das amostras natural



Fonte: Própria

Tabela 3-24. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função do teor de umidade nas amostras ensaiadas à compressão perpendicular às fibras.

Amostra	Teor de umidade	R^2	m	b
BN-Cr	11,68	0,17	-0,699	31,06
BT-Cr	12,20	0,29	-2,68	60,54
BGA-Cr	11,71	0,49	-1,16	35,25
BSM-Cr	12,31	0,44	-0,38	26,16
BGA-SM-Cr	12,68	0,5	-2,38	60,93
BGA-SMB-Cr	11,17	0,54	-1,90	51,93

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Soln. Glutaraldeído 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), Cr: compressão perpendicular às fibras. R^2 : coeficiente de correlação linear, m:inclinação, b:ponto de corte.

A pesar de o ensaio de compressão perpendicular às fibras não ser uma propriedade mecânica avaliada frequentemente nos corpos de prova de bambu, tem sido útil neste trabalho para identificar o papel que fazem os copolímeros impregnados no interior das amostras na propagação de energia deformante.

3.3.3.3. Ensaio de resistência à flexão

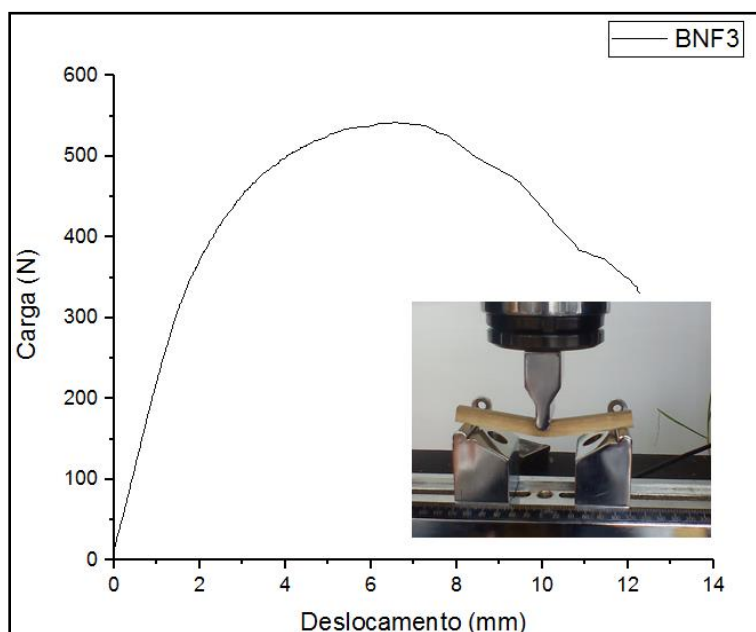
A relevância da resistência à flexão do bambu como parâmetro de aceitação deste material como um elemento estrutural levou à análise do comportamento dos corpos de prova de *B. vulgaris* neste trabalho. Na Figura 3-39, apresenta-se o comportamento característico de uma amostra do grupo natural, a amostra BNF3, durante o ensaio de resistência à flexão. A curva exhibe a variação da carga contra o deslocamento, e desta se calculou a resistência máxima (P_{max}), o valor de tensão a flexão no limite de elasticidade (σ_{LE}), e o módulo de elasticidade (E). Esses valores foram obtidos desde um procedimento proposto pelas professoras: Patricia Luna e Caori Takeuchi, da Universidad Nacional de Colômbia, no qual se usam as seguintes equações.

$$\sigma_{LE} = \frac{0,75M_{max.}}{S} \quad \text{Eq. 3-13}$$

$$E = \frac{PL^3}{48\Delta EI} \quad \text{Eq. 3-14}$$

A resistência no limite de proporcionalidade se calculou para cada corpo de prova com 75% da carga máxima alcançada no ensaio. Na Equação 3-13, S indica o módulo de resistência da seção, L o comprimento útil do espécimen (distância entre apoios), M_{max} o momento máximo no centro de L e P_{max} a força máxima aplicada. O módulo de elasticidade se calculou usando utilizando-se o grupo de dados entre 20% e 75% da carga máxima (P_{max}); o símbolo Δ , na Equação 3-14, indica o deslocamento no centro de L , e I o momento de inércia da seção transversal.

Figura 3-39. Curva de Carga – Deslocamento do corpo de prova ensaiado em flexão.



Fonte: Própria

Em geral, as amostras dos grupos natural e testemunha térmica apresentaram comportamento de deformação característico dos materiais elásticos, sem apresentar ruptura ou desfibramento. Por outro lado, algumas das amostras tratadas quimicamente, apresentaram quebra das fibras na face inferior do corpo de prova prismático quando se alcançou a máxima tensão durante o ensaio. No entanto, ao retirar-se a carga, os corpos de prova tenderam a repor a sua energia potencial elástica para o ponto central de flexão.

As amostras de referência, grupo natural, com densidade e teor de umidade médio de 628 kg/m^3 e 12,3%, respectivamente, atingiram valores de resistência máxima de 101,85 MPa e módulo de elasticidade de 8,3 GPa (Tabela 3-25). A tensão de ruptura para corpos de prova de os colmos inteiros da espécie *B. vulgaris* do Brasil foi da ordem de 106 MPa e o módulo de elasticidade em 8 GPa (Beraldo, 1987), e para a mesma espécie avaliada na Quênia, o valor obtido foi de 137,7 MPa (Mbugu, 2000). Dessa forma pode concluir-se que os resultados obtidos se utilizando pequenos corpos de prova foram próximos daqueles alcançados pelos espécimens elaborados a partir do colmo inteiro.

Tabela 3-25. Parâmetros de caracterização do ensaio de resistência à flexão para as amostras na condição natural.

Amostra	Resistência Max.	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
	f_{ct}	σ_{LE}	E	ρ	C. H.
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(kg/m ³)	(%)
BN-F1	116,44	87,33	9,14	654	10,09
BN-F2	109,12	81,84	7,10	644	12,02
BN-F3	94,88	71,16	7,98	600	13,27
BN-F4	97,27	72,95	8,84	618	12,82
BN-F5	96,34	72,25	7,36	621	13,90
BN-F6	101,74	76,30	8,78	640	10,50
BN-F7	106,04	79,53	8,33	629	10,03
BN-F8	93,05	69,79	6,95	613	14,15
BN-F9	100,86	75,65	7,53	644	12,96
BN-F10	102,80	77,10	8,31	621	10,57
Média	101,85	76,39	8,03	628	12,03
σ	7,17	5,38	0,77	16,76	1,61
C.V.	7,04	7,04	9,62	2,67	13,37

Fonte: Própria- B: Bambu, F: flexão.

As modificações químicas produzidas pelas infiltrações de substâncias fixadoras e pela impregnação de polímeros, alteraram o comportamento do bambu no ensaio de flexão, como se infere da Tabela 3-26. Os resultados apresentaram uma baixa dispersão com relação à média, de acordo com os valores de desvio-padrão e do coeficiente de variação, considerando-se a limitada quantidade de população de dados. A resistência máxima das amostras de *B. vulgaris* com densidade de 628 kg/m³ e teor de umidade de 12% se encontrou em torno a 102 MPa.

Os diagramas de caixa na Figura 3-40 mostram os valores de resistência à flexão máxima indicando os desvios significativos da média, e o aparecimento de pontos atípicos, que conforme já foi explicado, foram mantidos dentro da população para sua análise estatística. A infiltração com GA reduziu a dispersão dos dados, fato que se relaciona com o processo de lixiviação e de modificação química que teve o material durante a infiltração. Do gráfico se deduz que a infiltração com a solução FAA diminuiu a resistência à flexão

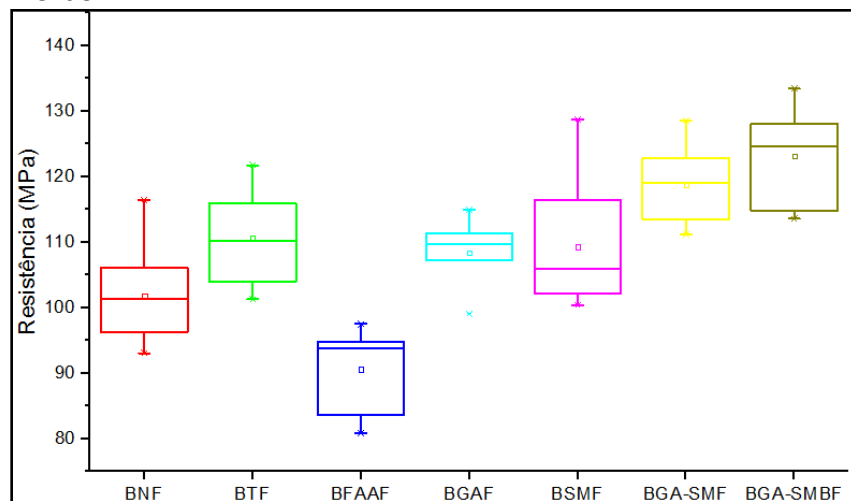
enquanto que o uso de glutaraldeído e a posterior impregnação com os copolímeros, SM e SMB, a aumentaram.

Tabela 3-26. Parâmetros avaliados durante os ensaios de resistência à flexão.

Amostra	Medida Estatística	Resistência Max.	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
		f_{cf} (MPa)	σ_{LE} (MPa)	E (GPa)	ρ (Kg/m ³)	CH (%)
BN-F	Média	101,85	76,39	8,03	628	12,03
	σ	7,17	5,38	0,77	16,76	1,61
	C.V.	7,04	7,04	9,62	2,67	13,37
BT-F	Média	110,69	83,02	9,43	634	10,98
	σ	7,53	5,65	1,03	39,70	1,65
	C.V.	6,81	6,81	10,93	6,26	15,02
BFAA-F	Média	90,59	67,94	9,09	648	10,13
	σ	6,03	4,52	0,63	18,44	1,41
	C.V.	6,66	6,66	6,91	2,85	13,89
BGA-F	Média	108,37	81,28	9,27	652	13,33
	σ	4,88	3,66	1,22	26,65	1,36
	C.V.	4,50	4,50	13,19	4,09	10,18
BSM-F	Média	109,32	81,99	9,71	686	12,45
	σ	9,30	6,98	1,22	15,98	2,18
	C.V.	8,51	8,51	12,58	2,33	17,54
BGA-SM-F	Média	118,73	89,04	10,50	641	10,62
	σ	5,48	4,11	1,07	21,71	0,97
	C.V.	4,61	4,61	10,22	3,39	9,13
BGA-SMB-F	Média	123,17	92,37	10,49	661	11,72
	σ	6,79	5,09	1,00	14,44	1,86
	C.V.	5,51	5,51	9,50	2,18	15,83

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução de GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), F: flexão.

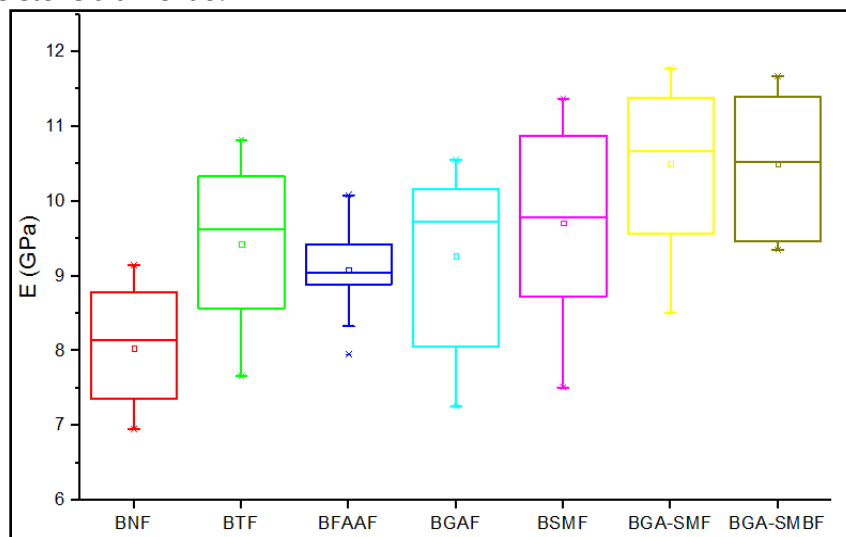
Figura 3-40. Diagramas de caixa dos valores de resistência (f_{cf}) obtidos no ensaio de resistência à flexão



Fonte: Própria-

Os diagramas de caixa, Figura 3-41, permitem observar a variação das médias dos resultados do módulo de elasticidade para os diferentes grupos analisados. Observou-se que a infiltração com as soluções fixadoras, e com a mistura de monômeros SM, aumentaram o módulo de elasticidade para valores próximos aos encontrados no processo de secagem (BT); no entanto ao juntar o processo de infiltração de solução GA e a impregnação com polímeros, o valor do MOE foi incrementado.

Figura 3-41. Diagramas de caixa dos valores de módulo de elasticidade (E) obtidos no ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Própria-

Os corpos de prova de acordo com os tratamentos que foram submetidos apresentaram diferentes variações percentuais nas propriedades mecânicas estudadas, em comparação com os valores das amostras denominadas de naturais (Tabela 3-27). Verificou-se que o tratamento térmico aumentou a resistência à flexão em 8,68% e o módulo de elasticidade (E) em 17,4%. O emprego da solução FAA embora tenha diminuído o valor da resistência à flexão, aumentou o valor do MOE, o que indica que o processo químico não modificou por completo o material vegetal, permitindo-lhe repor a energia após da deformação. Os demais tratamentos mantiveram a tendência e aumentaram a resistência máxima e o MOE, tendo como valores representativos aqueles atingidos pelas amostras infiltradas com GA e impregnadas com os copolímeros SM e SMB, sendo que esse último apresentou os maiores incrementos nas propriedades em estudo. Como parte das recomendações se sugere aumentar o tempo de impregnação com os monômeros, com o fim de estudar o efeito do tempo de infiltração em relação ao tamanho do corpo de prova.

Tabela 3-27. Variação porcentual em relação aos corpos de prova de referência em sua condição natural do ensaio de resistência à flexão.

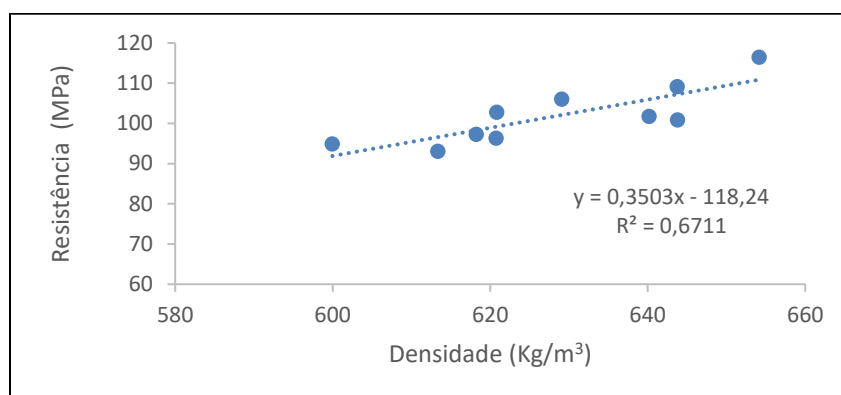
Amostra	Resistência Max.	Limite de elasticidade	Módulo de Elasticidade	Densidade	Teor de umidade
	f_{Cf}	σ_{LE}	E	ρ	C. H.
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(kg/m ³)	(%)
BT-F	8,68	8,68	17,40	0,88	-8,70
BFAA-F	-11,06	-11,06	13,17	3,05	-15,81
BGA-F	6,40	6,40	15,35	3,74	10,78
BSM-F	7,33	7,33	20,92	9,15	3,46
BGA-SM-F	16,57	16,57	30,75	2,03	-11,75
BGA-SMB-F	20,93	20,93	30,65	5,22	-2,54

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), F: flexão.

A resistência à flexão mostrou correlação linear positiva com a densidade e negativa com o teor de umidade, enquanto que o módulo de elasticidade não mostrou essa tendência (Lobo, 2014), razão pela qual só foram considerados os valores de P_{max} neste trabalho. No Anexo H, são apresentados os gráficos obtidos para todos os grupos analisados. As amostras naturais apresentaram a tendência de aumentar o valor de resistência à flexão em relação ao valor da densidade, Figura 3-42, embora o valor de correlação linear tinha sido de 0,67. A mesma tendência foi observada nas outras amostras analisadas, sendo que os coeficientes

foram menores (Tabela 3-28), nos diferentes grupos, incluindo-se as testemunhas térmicas. Em geral, a densidade das amostras apresentou modificações de acordo com os tratamentos térmicos ou químicos em relação às amostras de referência; no entanto dita modificação não alterou a dependência dessa propriedade com o valor de resistência máxima à flexão, de maneira significativa.

Figura 3-42. Resistência à flexão em função da densidade das amostras na condição natural.



Fonte: Própria

Tabela 3-28. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função da densidade nas amostras do ensaio de resistência à flexão.

Amostra	Densidade (kg/m³)	R²	m	b
BN-F	628	0,671	0,350	-118,2
BT-F	634	0,637	0,151	14,72
BFAA-F	648	0,510	0,180	-49,94
BGA-F	652	0,539	0,134	20,67
BSM-F	686	0,664	0,474	-216,12
BGA-SM-F	641	0,506	0,179	3,59
BGA-SMB-F	661	0,502	0,333	-97,06

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), F: flexão. R²: coeficiente de correlação linear, m:inclinação, b:ponto de corte

O teor de umidade afeta a resistência à flexão (Zaragosa-Hernández *et al.*, 2015), existindo diferentes faixas dentro das quais as fibras apresentam comportamentos característicos em relação à força e à direção da sua aplicação (Takeuchi, 2014). Do anterior, se fez necessária a homogeneização do teor de umidade dos corpos de prova de *B. vulgaris*, que na condição verde se encontrava entre 17 e 32%, permitindo aos corpos de prova

atingirirem a umidade de equilíbrio entre 9 e 13%. Com a diminuição do teor de umidade se observou o aumento da resistência máxima à flexão (Figura 3-43), apesar dos coeficientes de correlação linear serem inferiores a 0,70 (Tabela 3-29). A tendência dos dados, incluindo a dos resultados obtidos com a impregnação de copolímeros, foi a esperada com o aumento da resistência à flexão com a diminuição do teor de umidade, na faixa estudada.

O teor de umidade dos corpos de prova pode ser mascarado pela quantidade de polímero impregnado, já que o aquecimento em temperaturas superiores a 65°C, a temperatura de transição vítrea (Tg), os polímeros apresentam comportamento viscoelástico, tendendo a fluir no tecido e fora dele, o que interfere nas medidas da perda de massa com o aquecimento.

Figura 3-43. Resistência à flexão em função do teor de umidade das amostras na condição natural

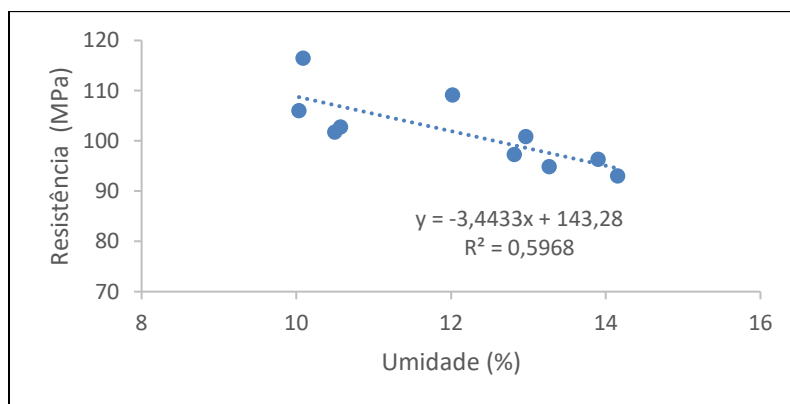


Tabela 3-29. Fatores de linearidade das gráficas de resistência em função do teor de umidade nas amostras do ensaio de resistência a flexão.

Amostra	Teor de umidade	R ²	m	b
BN-F	12,03	0,597	-3,44	143,28
BT-F	10,98	0,596	-3,52	149,42
BTFAA-F	10,13	0,477	-2,313	91,61
BTGA-F	13,33	0,53	-2,620	143,28
BTSM-F	12,45	0,685	-3,528	153,22
BTGA-SM-F	10,62	0,407	-3,607	157,02
BTGA-SMB-F	11,72	0,462	-2,485	152,31

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução GA a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), F: flexão. R²: coeficiente de correlação linear, m:inclinação, b:ponto de corte

Em geral, o comportamento mecânico das amostras de bambu, como se há estabelecido com espécies madeireiras (Ortigosa *et al.*, 2004), a natureza dos corpos de prova exerce as diferenças na modificação anatômica devido aos tratamentos químicos e à impregnação de polímeros repercutindo nas propriedades físicas e mecânicas.

3.3.4. Caracterização do material composto de bambu-polímero

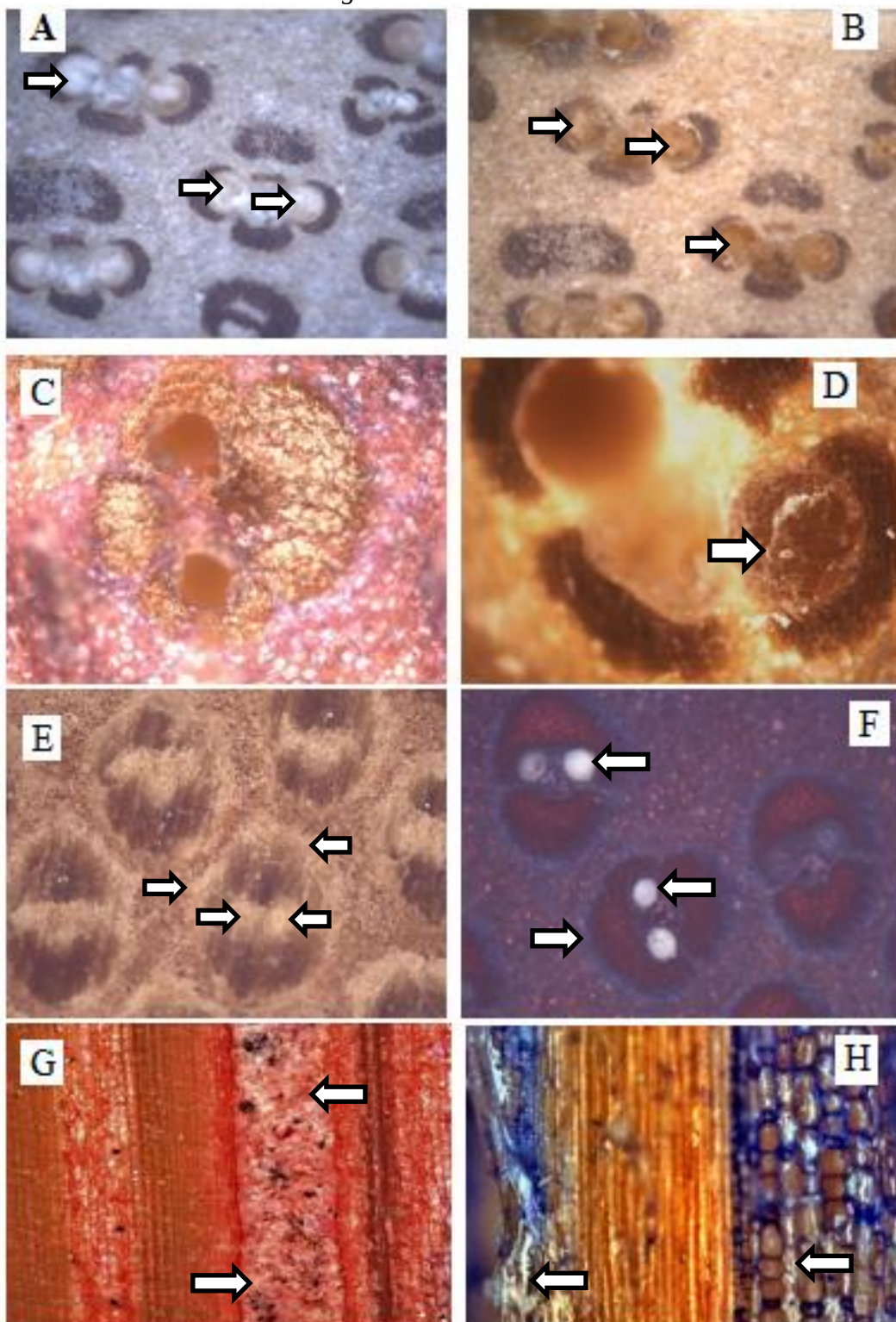
As amostras infiltradas com solução GA e aquelas impregnadas com polímeros, que mostraram modificação no volume e na massa após dos tratamentos, foram analisadas por meio de diferentes métodos de caracterização, com a finalidade de confirmar a impregnação das substâncias e de identificar as modificações que esses compostos propiciaram ao material lignocelulósico.

3.3.4.1. Análise por microscopia óptica de alta resolução (OM) e microscopia eletrônica de varredura (SEM)

Cortes transversais e axiais dos corpos de prova impregnados com o copolímero SM foram analisados através de microscopia óptica. Nas imagens na Figura 3-44, se apresenta uma microfotografia do bambu *B. vulgaris* sem nenhum tratamento (Fig. 3-44A), além de microfotografias das amostras impregnadas tomadas com diferentes aumentos, 5X, 10X e 20X (Fig. 3-44B a 3-44D), e microfotografias tomadas com diferentes filtros e campos de foco (Fig. 3-44E e 3-44F). Nas imagens, se pode notar uma diferença na coloração e no relevo, indicando a presença do polímero em alguns vasos de metaxilema e sobre as células do parênquima e das fibras.

Nas microfotografias dos cortes axiais, consegue-se identificar um vaso de metaxilema preenchido pelo que aparentemente é o polímero, com algumas partículas pretas originárias do processo de lixamento (Fig. 3-44G). O uso do corante azul de astra, para colorir as paredes celulares primárias, permitiu identificar a existência de espaços no interior do tecido do bambu impregnado e que não reagiram ao tingimento (Fig. 3-44H). Isto permite inferir que os polímeros modificam os componentes lignocelulósicos de tais paredes. Já a análise por microscopia de luz polarizada indicou que nas amostras de madeira impregnadas com polímeros, aproximadamente 70% do polímero se armazena na lamela média e os outros 30% na parede celular secundária (Morita *et al.*, 1991).

Figura 3-44. Imagens obtidas no microscópio óptico sobre as seções transversais e longitudinais das amostras de *B. vulgaris*

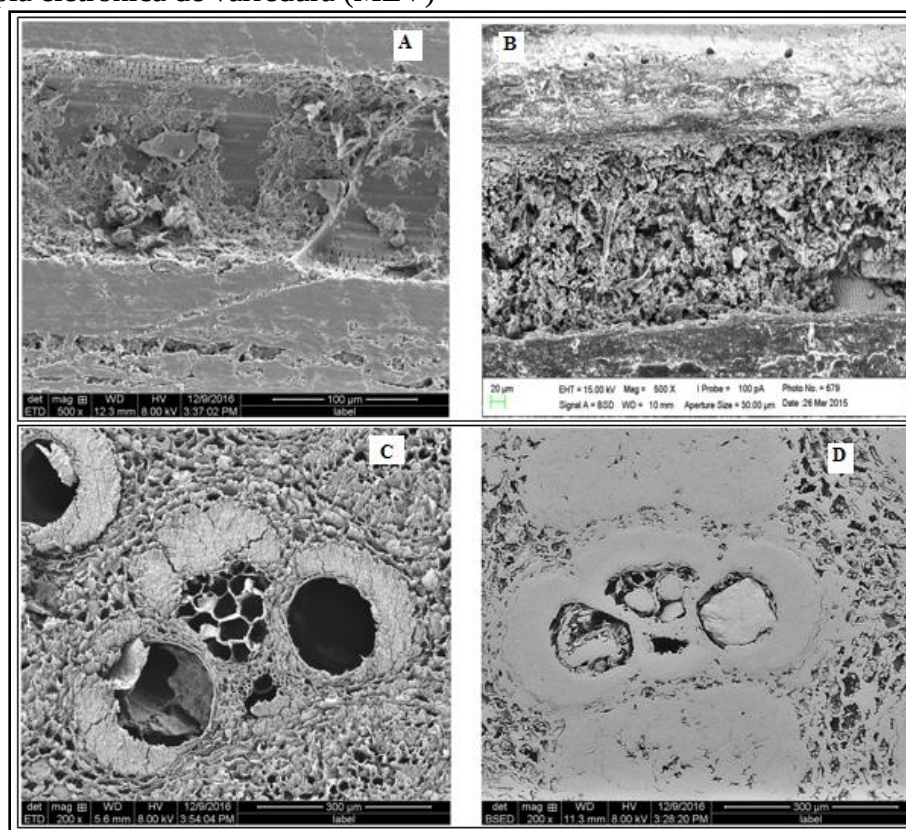


Fonte: Própria

As microfotografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) exibem a diferença entre uma amostra natural (Fig. 3-45A) e outra impregnada com o copolímero SMB (Fig. 3-45B). Na amostra impregnada se identifica o polímero no interior dos vasos do metaxilema e em alguns tubos crivados do floema. O parênquima e as fibras também apresentaram mudanças em suas superfícies.

Nas microfotografias dos cortes axiais da amostra impregnada impregnado com SMB, pode-se identificar a parede do vaso com os respectivos *pits* ou orifícios do metaxilema, assim como o recobrimento superficial do metaxilema com polímero (Fig. 3-45C). Outros vasos de metaxilema apresentaram maior volume de preenchimento com polímero, relatando-se que os feixes de elétrons do equipamento, que fazem o escaneamento da imagem, modificaram a morfologia do SMB (Fig. 3-45D), ao ultrapassarem a temperatura de transição vítrea do polímero.

Figura 3-45. Imagens de cortes transversais e axiais das amostras de *B. vulgaris* obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV)



Fonte: Própria

A análise das amostras por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), permitiu inferir que a principal via para o fluxo dos polímeros através dos corpos de prova são os vasos de metaxilema, conforme relataram Liese (2004) e Espelho (2007). O tecido condutor, que representa cerca de 10% do volume total do colmo, é o espaço pelo qual se realiza o deslocamento de seiva por meio da infiltração de substâncias. Também, a impregnação do tecido de bambu com nanopartículas de prata, mostrou a preferência que as suspensões em quitosana, com polaridade positiva, apresentaram para depositarem-se nos vasos, enquanto que as suspensões em citrato sódico, de carga negativa, preferiram as células de parênquima (Panoli, *et al.*, 2015).

As microfotografias revelaram que a distribuição dos polímeros no interior das células não foi homogênea dentro dos vasos, e foram identificadas grandes quantidades de amido no interior das células de parênquima. Por outro lado, Keplinger *et al.* (2015) relataram que a celulose da parede celular da madeira é modificada pela impregnação com anidro metacrílico, e identificaram a presença de copolímeros de enxerto, como resultado da polimerização *in situ* com monômeros de estireno.

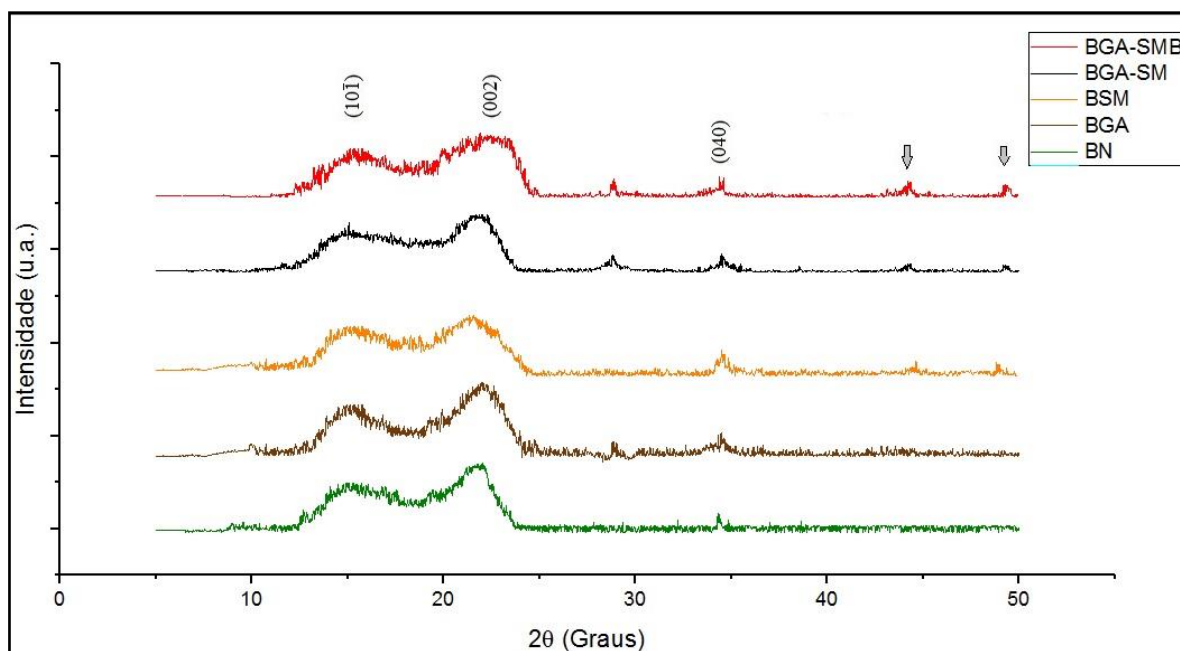
A análise por microscopia MEV permitiu destacar a presença do polímero no interior do tecido; no entanto, se faz necessário efetuar outras análises através de EDS ou com espectroscopia Raman, para confirmar a modificação do material com a polimerização *in situ*, uma vez que a composição química elementar do material lignocelulósico e dos copolímeros são basicamente semelhantes (carbono, hidrogênio e oxigênio), e microscopia eletrônica de varredura (SEM) não permitiu a diferenciação entre esses componentes.

3.3.4.2. Análise por difração de raios-X (DRX)

A análise por difração de raios-X (DRX) das amostras lignocelulósicas do bambu permitiu a identificação dos planos de rede que caracterizam a celulose (Fig 3-46). O material lignocelulósico obtido a partir de amostras compostas de diferentes corpos de prova exibiu orientações nos planos (002) e (10 $\bar{1}$), caracterizados pelos picos 21,8° e 15,2°, valores muito próximos aos picos 22,3° (002), e 15,8° (10 $\bar{1}$), relatados por Liu (2012) para os

difratogramas de fibras de bambu Moso (*Phyllostachys pubescens*), planos que foram relacionadas com a seção longitudinal da estrutura da celulose. Por outro lado, a comparação entre os planos de difração obtidos com aqueles observados por Sanchez e Rodriguez (2011), permitiu reconhecer que o pico em $34,3^\circ$ indica a presença do plano (040), o qual identifica a seção transversal da estrutura da celulose.

Figura 3-46. Difratoograma comparativo das amostras de *B. vulgaris* Natural e com diferentes processos de infiltração e impregnação.



Fonte: Própria- BN: Bambu Natural, BGA: Bambu infiltrado com GA a 2,5%, BSM: Bambu impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SM: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SMB: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA-co-BuA).

O difratograma das amostras infiltradas com solução GA apresentou um aumento no pico em $34,4^\circ$; no material natural esse pico parece ter sido mascarado pela hemicelulose e a lignina amorfa, conforme indicado por Nazir *et al.* (2013). Também, como resultado do tratamento se evidenciou o aumento do pico do plano (101), o que indica a remoção de material amorfo. Os difratogramas das amostras impregnadas com polímeros apresentaram novos picos em $44,2^\circ$ e $49,3^\circ$, o quais não são relativos à cristalinidade dos copolímeros, já que eles são amorfos. No entanto, se infere que as modificações causadas pela impregnação revelaram a existência desses planos de difração que estavam sendo mascarados. A impregnação de pequenas amostras da Seringueira (*H. brasiliensis*) com monômeros de

St/MMA apresentou picos em 43,6°, 49,1°, 49,2°, 50,9° e 72,7°, o que foi relacionado com a formação do material compósito no interior da madeira (Saiful *et al.*, 2012).

O aumento do grau de cristalinidade após do tratamento foi confirmado utilizando-se a seguinte relação:

$$CG = \frac{I_{002} - I_{amorfo}}{I_{002}} \times 100 \quad \text{Eq 3-10}$$

Onde I_{002} é a intensidade do pico característico do plano de rede (002), e cuja reflexão é atribuída à parte cristalina e amorfa da amostra, enquanto que I_{amorfo} é a depressão entre os picos em 15,6° e 22°, que representa o material amorfo (20~18,4°), de acordo com vários autores (Morán, 2008; Simarani *et al.* 2009; Li *et al.* 2010 e Nguyen *et al.* 2013).

Os resultados apresentados na Tabela 3-30 indicam que as amostras naturais (BN) apresentam um grau de cristalinidade de 55,53%, valor próximo a 59,7% relatado por Liu *et al.* (2012), para celulose tipo I encontrada nas fibras de bambu. Também se identifica que a infiltração com solução GA aumentou a cristalinidade do material lignocelulósico, ou seja, o resultado indicou a eliminação de material amorfo das amostras com esse tratamento. Cabe destacar, que se foram realizadas réplicas dos difratogramas com o fim de comparar os resultados do grau de cristalinidade, e ter uma avaliação da reprodutibilidade das medidas baseado no coeficiente de variação.

Os tratamentos de impregnação e de polimerização *in situ* com os diferentes monômeros testados, reduziram o grau de cristalinidade, o que pode ser consequência da retenção de material amorfo juntamente com o fato da modificação ou da eliminação de celulose cristalina durante a infiltração dos monômeros. Xiaoying *et al.* (2012), utilizando pequenas amostras de madeira de álamo, *Populus ussuriensis* Kom y Micheliamacclurel, após da polimerização *in situ* de monômeros de St/MMA referiram-se a perda de cristalinidade em 8,0%, associando-a com a retenção do material amorfo dentro do lúmen das células.

Tabela 3-30. Influência dos tratamentos químicos de infiltração e de impregnação sobre o grau de cristalinidade do material lignocelulósico do bambu *B. vulgaris*.

Amostra	I ₀₀₂	I _{amorfo}	C.G. (%)
BN	3535	1572	55,53
BGA	4641	1553	66,53
BSM	3075	1615	47,47
BGA-SM	3013	1524	49,42
BGA-SMB	3188	1460	52,72

Fonte: Própria- B: Bambu, GA: Solução de glutaraldeído a 2,5%, SM: poli(St-co-MMA), SMB: poli(St-co-MMA-co-BuA), C.G.: grau de cristalinidade.

Embora nenhuma literatura refira-se ao efeito que as soluções preservantes tem sobre o grau de cristalinidade do material lignocelulósico do bambu, é reconhecido que as infiltrações com substâncias como o hidróxido de sódio, geram modificações do material e que resultam na aparição de novos picos nos difratogramas (Saiful *et al.*, 2012), e que a degradação de hemicelulose e de lignina exercem alterações nos difratogramas (Mahato *et al.*, 2013), transformações que estas podem ser ocasionadas por diferentes tipos de substâncias que modifiquem o material lignocelulósico.

Em geral, os resultados mostraram que a fração cristalina do material lignocelulósico natural foi modificada pelo tratamento de polimerização e que a adição do acrilato de butila não contribuiu significativamente na perda de cristalinidade.

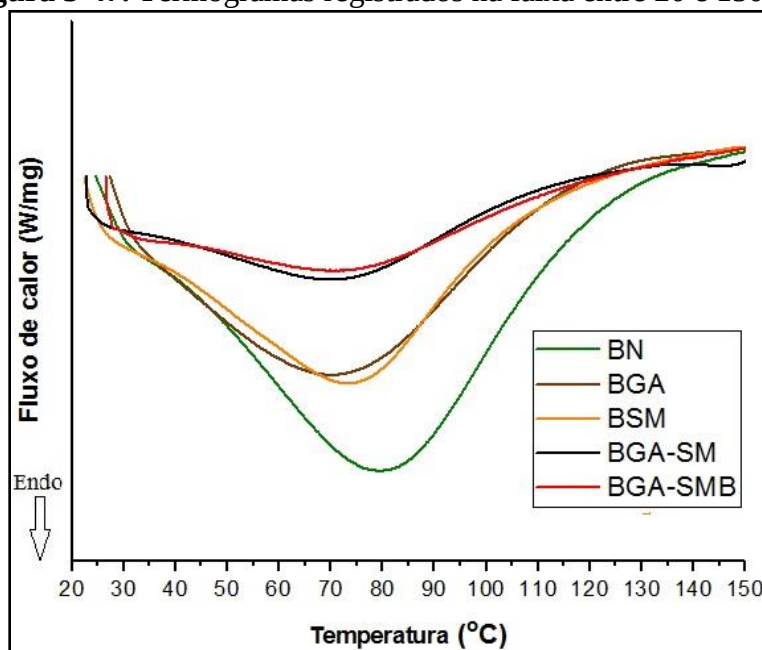
3.3.4.3. Análise calorimétrica das amostras de Bambu *B. vulgaris*

3.3.4.3.1. Análise por calorimetria de varredura diferencial (DSC)

Um corte dos termogramas obtidos entre 50 e 150°C se apresenta na Figura 3-47. A amostra natural apresentou um pico endotérmico em 79,17°C, enquanto que a amostra infiltrada com solução GA apresentou um pico centrado em 69,72°C, e a amostra impregnada com SM sem pre-tratamento com solução GA apresentou o pico em 73,07°C. As amostras infiltradas com glutaraldeído e impregnadas com SM exibiram o pico em 70,34°C e aquela impregnada com SMB em 70,96°C.

Os picos observados na faixa entre 25°C e 100°C se relacionam ao processo de desidratação, atribuindo-se o aumento do tamanho do pico à maior absorção da água, e o deslocamento dos picos na faixa entre 250°C e 400°C para temperaturas maiores relacionan-se à perda de cristalinidade como efeito da modificação estrutural da celulose (Ciolacu *et al.*, 2011). Assim que, a diminuição na temperatura em relação à amostra infiltrada com solução GA em relação à amostra natural, se relacionou com o aumento da cristalinidade, de acordo com os resultados obtidos por meio da análise de difração de raios-X, no entanto, o comportamento das amostras impregnadas com polímeros apesar de ter exibido picos em temperaturas menores do pico próprio da amostra natural, não se relacionou com o grau de cristalinidade, já que os valores encontrados neste trabalho para tais amostras por meio de DRX foram inferiores àqueles obtidos para as amostras naturais. Além disso, o tamanho do pico deveria aumentar com a diminuição da cristalinidade e, no entanto, as amostras impregnadas com SM e SMB não apresentaram esse comportamento. Em geral, a impregnação com polímeros reduz a hidrofília do material lignocelulósico, não pelo fato de aumento no grau de cristalinidade, mas também pela blindagem gerada pelos polímeros no interior no material.

Figura 3-47. Termogramas registrados na faixa entre 20 e 150 °C.

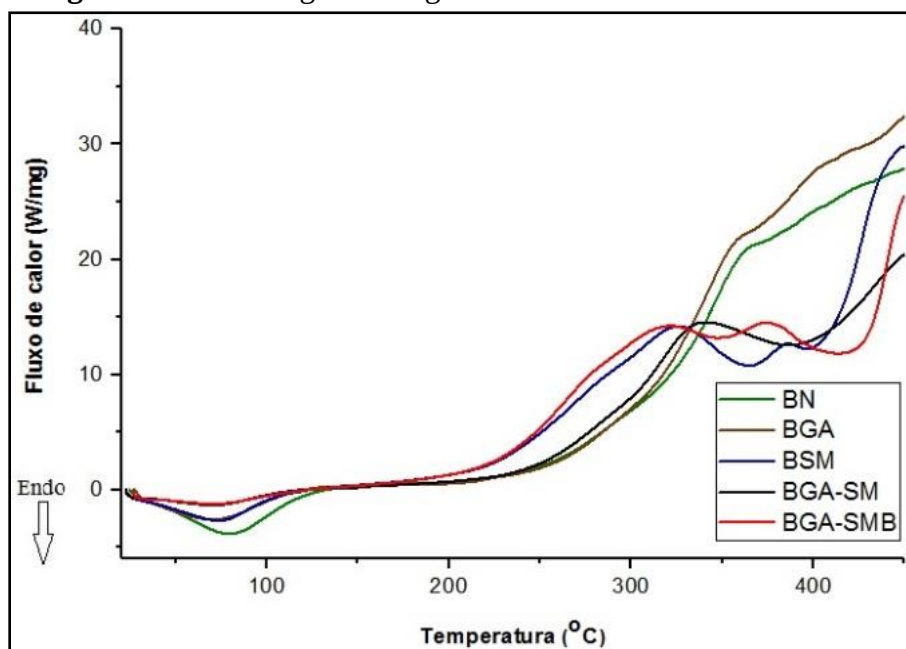


Fonte: Própria- BN: Bambu Natural, BGA: Bambu infiltrado com GA a 2,5%, BSM: Bambu impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SM: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SMB: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA-co-BuA).

O pico correspondente à temperatura de degradação da celulose geralmente é registrado em 310°C; no entanto pode ser mascarado possivelmente pelos grupos carboxilas de outros componentes causando o deslocamento do pico para temperaturas mais elevadas (Mahato *et al.*, 2013).

Os termogramas na faixa completa de temperatura, entre 20 e 500°C se apresentam na Figura 3-48, podendo observar-se que a amostra natural e a infiltrada com solução GA apresentaram gráficos característicos do material lignocelulósico, com picos exotérmicos em 367 e 358°C respectivamente, deve-se notar que o tratamento com GA diminuiu a temperatura e a forma do pico o que se relaciona com a perda de material amorfo. Os termogramas das amostras impregnadas BSM, BGA-SM e BGA-SMB apresentaram gráficos híbridos entre aqueles encontrados para o material lignocelulósico e para os polímeros, exibindo picos endotérmicos na faixa entre 348,7°C e 371,9 °C, na qual se caracterizam os copolímeros.

Figura 3-48. Termogramas registrados na faixa entre 25 e 450 °C.



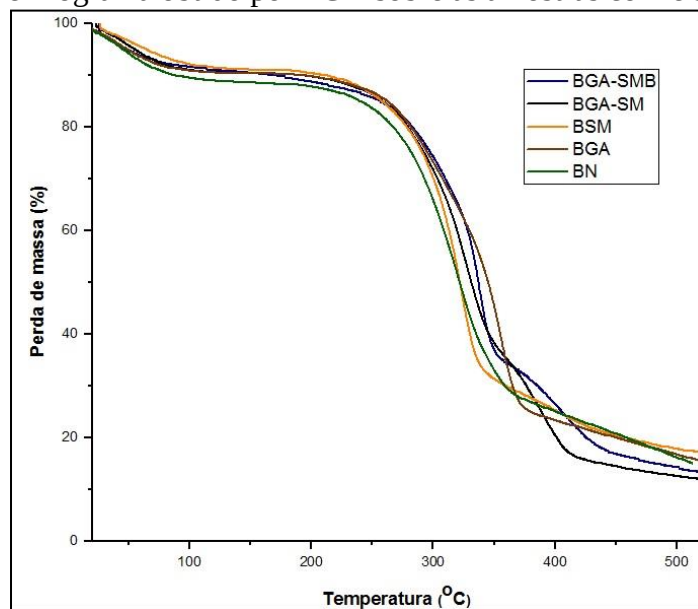
Fonte: Própria- BN: Bambu Natural, BGA: Bambu infiltrado com GA a 2,5%, BSM: Bambu impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SM: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SMB: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA-co-BuA).

3.3.4.3.2. Análise termogravimétrica (TGA)

A celulose, a hemicelulose e a lignina apresentam temperaturas de decomposição diferentes, conforme suas diferentes composições químicas. Com a análise termogravimétrica se consegue identificar a decomposição da celulose entre os 315°C e os 400°C, tendo-se uma maior perda de massa próximo dos 335°C. Por sua vez, a hemicelulose se decompõe entre 220 e 315°C, com uma maior perda de massa próximo de 268°C; e a decomposição da lignina ocorre desde os 160°C e continua até os 700°C (Yang *et al.*, 2007).

As amostras infiltradas com GA e impregnadas com os polímeros mostraram diferenças na perda de massa em relação à amostra natural, exibindo uma decomposição em duas etapas bem definidas, como se observa na Figura 3-49. Nas temperaturas na faixa entre 220°C e 315°C, observando-se a perda de hemicelulose e, entre 315°C e 400°C, observa-se a perda de celulose. Também se observou que as amostras denominadas de naturais, as infiltradas com GA e as impregnadas com SM sem infiltração de GA apresentaram menor perda de massa, enquanto que aquelas tratadas com GA e impregnadas com polímeros apresentaram a maior perda, o que indica que a modificação causada pelo material polimérico diminuiu a produção de resíduos finais no processo de queima dessas amostras.

Figura 3-49. Termograma obtido por TGA sobre as amostras com e sem tratamento.

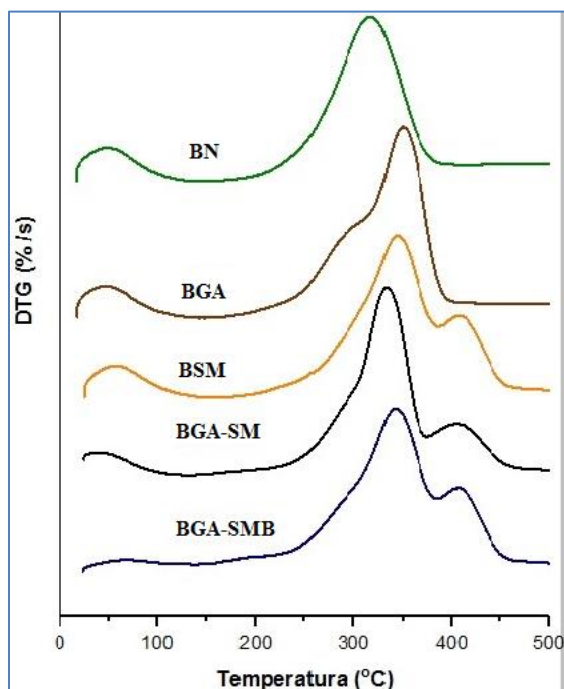


Fonte: Própria- BN: Bambu Natural, BGA: Bambu infiltrado com GA a 2,5%, BSM: Bambu impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SM: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SMB: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e imprgnado com poli(St-co-MMA-co-BuA).

As curvas de DTGA permitem identificar a velocidade de perda de massa com relação à temperatura. As amostras em geral, como se observa na Figura 3-50, exibiram um primeiro pico na faixa que se relaciona com a umidade, entre 20 e 110°C; para as amostras impregnadas com polímeros esse pico é menor do que para as outras amostras. O pico em 317,5°C da amostra se apresenta deslocado em relação às demais, indicando a modificação do material lignocelulósico. Uma pequena depressão no pico própria da amostra infiltrada com GA indica a perda de hemicelulose.

As amostras impregnadas com copolímeros, BSM, BGA-SM e BGA-SMB apresentaram um novo pico próximo a 407°C, pico já exibido nos termogramas dos polímeros, analisados no capítulo anterior deste trabalho. Com o resultado anterior se confirma a presença das substâncias poliméricas no material. Em geral, o processo de degradação das ligações covalentes nas cadeias poliméricas em função da temperatura mostra-se uma ferramenta útil como parâmetro de comparação entre compósitos impregnados com polímeros.

Figura 3-50. Curva derivada DTGA das amostras.



Fonte: Própria - BN: Bambu Natural, BGA: Bambu infiltrado com GA a 2,5%, BSM: Bambu impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SM: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e impregnado com poli(St-co-MMA), BGA-SMB: Bambu infiltrado com GA a 2,5% e imprgnado com poli(St-co-MMA-co-BuA).

3.3.4.5. Análise por espectrofotometria infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)

A análise por espectroscopia de infravermelho (FTIR) das amostras compostas, extraídas dos corpos de prova dos diferentes grupos em estudo do *B. vulgaris*: N, T, GA, SM, GA-SM e GA-SMB, foi realizada com o objetivo de comparar as alterações que os tratamentos, aos quais foram submetidas as amostras, causaram ao material lignocelulósico. As condições de processamento, armazenamento e teor de umidade permaneceram constantes para todas as amostras, a fim de evitar possíveis interferências nos resultados, destacando-se a importância de manter as amostras em pó em dessecadores com sílica-gel, para reduzir a absorção da umidade do ambiente durante o processo experimental.

Nos espectros de todas as amostras apresentadas na Figura 3-51, aparece uma banda ampla em 3409cm^{-1} , devido ao estiramento do grupo hidroxilo (-OH), mostrando-se um pouco deslocada, reduzida ou ampliada nos espectros das amostras com tratamento, o que foi associado com a diminuição do conteúdo de água, ou com a modificação do grupo -OH da celulose, devido às reações com os aldeídos e a presença de celulose amorfa (Li *et al.*, 2010). O pico próximo à banda em 2920cm^{-1} correspondente, ao estiramento da ligação -CH dos compostos alifáticos saturados próprios da celulose, hemicelulose ou dos polissacarídeos da lignina (Nguyen *et al.*, 2013), foi ligeiramente deslocado como resultado da infiltração com a solução GA.

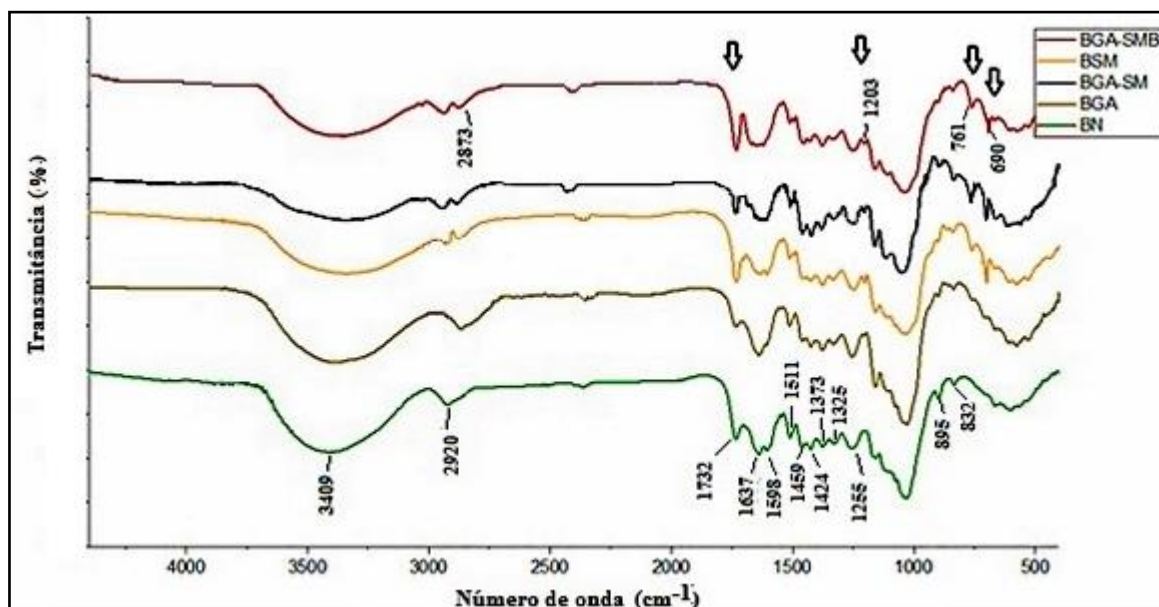
Com a impregnação dos polímeros, a banda em 3409cm^{-1} devida ao grupo -OH foi reduzida e mostrou alterações na forma. A modificação do pico anterior se relaciona com a perda de umidade, o que se confirmou com a diminuição no pico em 1637cm^{-1} em comparação com a amostra natural (Guimarães *et al.*, 2014). O pico em 2920cm^{-1} apresentou um pico adjunto em 2873cm^{-1} , referido por Saiful *et al.* (2012), para compósitos de madeira e poli(St-co-MMA), em 2924cm^{-1} .

Os grupos aromáticos da lignina no infravermelho aparecem entre 1500 e 1600cm^{-1} (Saiful *et al.*,2012). Nos espectros obtidos para o *B. vulgaris*, o pico em 1511 cm^{-1} apresentou diminuição e deslocamento com os tratamentos de impregnação, o que indicou a perda de componentes como o grupo guacila da lignina.

No espectro podem-se observar os picos em 1732 cm^{-1} , devido ao alongamento do grupo carbonila ($\text{C}=\text{O}$) e em 1203 cm^{-1} devido ao alongamento do grupo $\text{C}-\text{O}$, picos marcados com setas, os quais são característicos da hemicelulose e da lignina, porém que também se devem aos acrilatos, tais como: o acrilato de butilo e o metacrilato de metila, que são alguns dos monômeros utilizados na impregnação das amostras de bambu. O aumento desses picos se atribuiu portanto à impregnação dos acrilatos no material lignocelulósico.

Os picos em 694cm^{-1} e em 787cm^{-1} devidos, à deformação dos grupos $\text{C}-\text{H}$ e à deformação causada pela ressonância do anel de benzeno do estireno, aparecem nos espectros das amostras impregnadas com polímeros, em 761 cm^{-1} e em 690 cm^{-1} , respectivamente. As setas ressaltam esses picos já que são de grande importância para confirmar que o material lignocelulósico dos corpos de prova foram modificados quimicamente pela impregnação com os copolímeros SM e SMB, inclusive sem ter feito uma pre-infiltração com solução GA.

Figura 3-51. Espectros na região do infravermelho das amostras de bambu natural e as tratadas quimicamente.

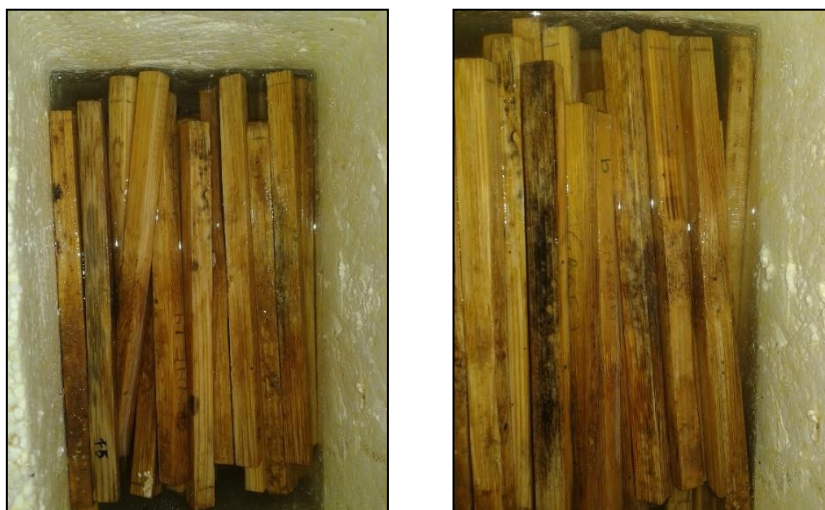


Fonte: Própria.

3.3.5. Absorção de água e variação dimensional

Dentre as deficiências relatadas para as aplicações do bambu como um elemento estrutural encontra-se a elevada taxa hidrofílica que apresenta esse material. O inchamento e a retração do bambu causam alterações nos elementos estruturais. Neste estudo, 9 amostras foram escolhidas a fim de determinar a variação dimensional e da massa que ocorre após os tempos de imersão em água de 1, 8, 24, 48, 336 e 720 h. Os dados obtidos para todos os grupos em estudo são apresentados no Anexo I. Na Figura 3-52, pode-se observar que algumas das amostras (N) sofreram modificações em sua coloração, possivelmente devido ao crescimento superficial de fungos.

Figura 3-52. Ensaio de absorção de água usando corpos de prova de *B. vulgaris* com e sem tratamentos térmico e químico



Fonte: Própria-

A análise estatística dos dados obtidos é apresentada na Tabela 3-31. Como se pode observar, os coeficientes de variação nas primeiras 48 h são elevados, o que pode dever-se ao baixo número de amostras analisadas. No entanto, nas últimas duas medições do tempo, a 336 e 720 h, a dispersão de dados se mostrou menor, permitindo a comparação dos

resultados entre os diferentes grupos de amostras. Portanto, se assumiu o tempo de 720 h como parâmetro de comparação entre os diferentes grupos em estudo.

Tabela 3-31. Porcentagem de absorção de água dos corpos de prova de *B. vulgaris*.

Amostras	Parâmetro estatístico	Tempo (h)					
		1	8	24	48	336	720
BN-AA-m	Média	11,42	15,74	22,06	26,20	38,20	47,26
	σ	2,60	1,27	0,39	0,35	0,82	1,36
	C.V.	22,81	8,05	1,77	1,32	2,14	2,88
BT-AA-m	Média	12,03	13,86	30,82	48,10	55,15	62,20
	σ	0,30	0,96	3,06	3,47	1,79	1,87
	C.V.	2,52	6,92	9,94	7,21	3,25	3,01
BGA-AA-m	Média	-1,93	-0,30	2,05	5,28	26,80	33,28
	σ	0,06	0,12	0,21	0,32	0,83	1,08
	C.V.	-2,88	-40,97	10,29	6,09	3,10	3,23
BSM-AA-m	Média	-0,63	1,57	3,31	6,68	18,62	27,69
	σ	1,54	0,46	0,90	0,91	0,46	1,26
	C.V.	244,16	29,60	27,10	13,61	2,46	4,55
BGA-SM-AA-m	Média	-0,06	1,44	2,76	4,39	10,21	21,53
	σ	0,12	0,12	0,12	0,09	0,16	2,15
	C.V.	190,32	8,08	4,22	2,02	1,52	10,01
BGA-SMB-AA-m	Média	0,05	1,01	4,52	5,94	9,44	19,53
	σ	0,70	0,58	1,05	1,17	1,14	1,23
	C.V.	1335,11	57,17	23,19	19,60	12,12	6,28

Fonte: Própria- , **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **m**:massa

A comparação das médias dos resultados agrupados com as amostras identificadas como naturais (N) indicaram que a infiltração com GA e as impregnações com polímeros diminuíram a absorção de água, enquanto que as amostras que só sofreram o processo térmico, o aquecimento, mostraram valores mais elevados do que àqueles das amostras naturais (Tabela 3-32). A infiltração com solução GA e os processos de infiltração seguidos da impregnação com copolímeros foram aqueles que mostraram menor absorção de água, de 54,45% e 58,67% em relação às amostras de referência (N). Pode-se inferir dos resultados que o material vegetal foi modificado pelos tratamentos, o que repercutiu na hidrofília, o que já se tinha estabelecido por médio da análise de difração de raios-X e DSC.

Tabela 3-32. Variação porcentual da absorção de água nos corpos de prova a diferentes tempos de imersão em relação as amostras em sua condição natural.

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BT-AA-m	5,35	-11,98	39,71	83,62	44,36	31,62
BGA-AA-m	-116,89	-101,89	-90,71	-79,83	-29,85	-29,58
BSM-AA-m	-105,53	-90,06	-85,01	-74,51	-51,27	-41,40
BGA-SM-AA-m	-100,55	-90,84	-87,50	-83,25	-73,28	-54,45
BGA-SMB-AA-m	-99,54	-93,60	-79,51	-77,31	-75,30	-58,67

Fonte: Própria; **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **m**:massa

A absorção de água provoca inchamento da amostra. No Anexo I, são apresentados os dados e os gráficos referentes às variações na largura, espessura e no volume dos corpos de prova. O resumo dos resultados do inchamento na direção da largura e alguns parâmetros de avaliação estatística são apresentadas na Tabela 3-33, na qual se observa que durante as primeiras 24 h, os resultados não apresentaram uma tendência, observando-se só até 336 h.

A comparação entre as amostras dos diferentes grupos com o grupo de referência (N) permitiu identificar que os corpos de prova que acompanharam o processo térmico (T), mantiveram menor incremento da largura (b), a face tangencial do corpo prismático; que as amostras naturais até 336 h, logo às 720 h apresentaram expansão em relação às amostras BN. Os demais tratamentos indicaram diminuição de inchamento, especialmente as amostras impregnadas com copolímeros.

Tabela 3-33. Porcentagem do inchamento na largura (b) das amostras após diferentes tempos de imersão.

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BN-AA-t	1,40	4,29	9,79	10,62	11,37	12,28
BN-AA-t	1,04	2,12	3,42	5,41	9,25	13,10
BT-AA-t	1,81	3,44	8,79	9,61	9,66	10,93
BGA-AA-t	-0,18	1,83	3,87	5,12	7,22	9,73
BSM-AA-t	0,06	0,86	2,21	3,45	5,00	9,20
BGA-SM-AA-t	-0,14	1,52	2,86	4,57	7,07	9,81

Fonte: Própria; **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **t**:face tangencial

O inchamento na espessura (h) das amostras, medida feita sobre a face radial do corpo de prova prismático, como se observa na Tabela 3-34, apresentou um comportamento similar ao inchamento da largura, porém com maior inchamento nas amostras impregnadas com polímeros. Por sua vez, as amostras que foram submetidos ao processo térmico apresentaram maiores inchamentos com respeito aos espécimens naturais de referência (Anexo I).

Tabela 3-34. Porcentagem da expansão da espessura (h) das amostras em diferentes tempos de imersão.

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BN-AA-r	1,15	4,75	14,33	17,12	19,29	21,94
BT-AA-r	3,72	3,31	7,81	10,23	15,46	25,10
BGA-AA-r	2,12	4,93	14,18	16,04	19,83	21,55
BSM-AA-r	0,02	1,02	2,60	5,07	14,18	16,53
BGA-SM-AA-r	-0,14	2,79	5,72	7,57	11,34	13,99
BGA-SMB-AA-r	-0,13	1,33	2,37	3,05	8,54	13,13

Fonte: Própria- , **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **r**: Face radial

Os resultados da variação do comprimento dos corpos de prova se detalham no Anexo I. Os resultados da Tabela 3-35 são baseados nas medidas expostas anteriormente, já que o volume depende das dimensões avaliadas, porém se identificou o mesmo comportamento de inchamento. Em geral, as amostras com tratamento térmico tiveram aumento de volume em relação às amostras BN, e os tratamentos químicos realizados nas amostras reduziram em até 31% a variação volumétrica dos corpos de prova; os menores incrementos foram os pertencentes às amostras pré-infiltradas com GA e impregnadas com SM e com SMB (Anexo I).

Tabela 3-35. Porcentagem do inchamento volumétrico (v) das amostras após diferentes tempos de imersão.

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BN-AA-v	9,49	9,49	26,04	30,23	33,80	36,60
BT-AA-v	4,89	5,65	11,85	16,60	27,08	42,62
BGA-AA-v	0,46	2,44	9,86	13,67	24,27	28,49
BSM-AA-v	-0,16	3,12	6,99	10,97	23,37	28,89
BGA-SM-AA-v	-0,08	3,71	8,13	11,41	17,50	25,33
BGA-SMB-AA-v	-0,29	2,89	5,37	7,94	16,85	25,27

Fonte: Própria- , **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **v**: volume

Em comparação com os resultados obtidos para a espécie *G. angustifolia* Kunth (Reyes, 2016) a variação dimensional do *B. vulgaris* mostrou uma diferença significativa, já que na primeira espécie o inchamento das amostras impregnadas com polímero foi menor na largura (b), entanto que na segunda espécie mencionada, foi o maior o inchamento na direção da espessura (h). Os valores na variação volumétrica e na massa entre as duas espécies apresentaram diferenças, as quais atribuem-se à natureza estrutural e química própria das espécies.

3.3.6. Resistência à degradação

O tratamento de bambu com substâncias preservativas tem sido referido, não só para melhorar as propriedades mecânicas, mas, sobretudo, para aumentar a resistência à degradação causada por insetos e fungos. Geralmente, os métodos de conservação do bambu por imersão, utilizando-se misturas de sais de boro e de ácido bórico, em proporções 1:1 ou maiores, durante 8 a 15 dias, para reduzir em mais de 50% os ataques degradativos (Montoya, 2008). O tratamento com sais de boro junto à impregnação com resinas uréia-formaldeído permite serem obtidas vantagens além de reduzir o ataque de *Dinoderus minutus*, como também em aumentar a resistência à compressão paralela às fibras (Peña *et al.*, 2009).

Neste trabalho, se inovou com a infiltração de substâncias fixadoras de tecido, ao se utilizar solução de glutaraldeído a 2,5% e solução FAA, assim como impregnações com copolímeros, poli(St-co-MMA) e poli(St-co-MMA-co-BuA), nos corpos de prova de proporção 1:1:15, tal como foram utilizados para o ensaio de flexão. Embora o ensaio mais conhecido para a determinação da resistência à degradação sejam os campos de apodrecimento, se apresentam a seguir os resultados das amostras deixadas em contato permanente com *Dinoderus minutus* em atmosfera aberta, a 28 °C, no galpão do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas, o LABEME, na Universidade Federal da Paraíba. As amostras denominadas de naturais, após 6 meses de exposição apresentaram grandes sinais de degradação em sua estrutura (Fig. 3-53), enquanto que as amostras utilizadas como testemunhas térmicas apresentaram manchas pretas e hifas de fungos sobre a superfície.

Portanto, se infere que os tratamentos, incluindo as soluções fixadoras, exerceram também um papel como agente conservante no bambu.

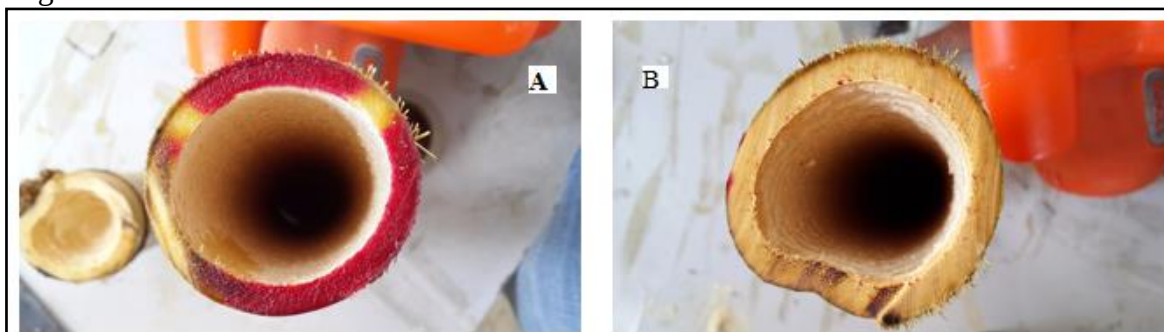
Figura 3-53. Fotografias das amostras submetidas a contato com *Dinoderus minutus* em condições ambientais.



Fonte: Própria-

Colmos de *B. vulgaris* foram infiltrados sob pressão no LABEME da UFPB, com solução de hidróxido de sódio a 5%, e logo cortados e testados com indicador fenolftaleína, com o fim de identificar se o fluxo interno da solução alcalina ao longo do colmo era homogêneo. No entanto, como se observa na Figura 3-54A e 3-54B, onde se apresentam cortes logo o primeiro nó e o segundo nó, infiltrados e tingidos, existem diferenças significativas na reação com o indicador com a passagem pelos nós. Isto permite inferir que a complexa estrutura anatômica do bambu e a natureza da solução infiltrada são fatores chave para ser considerado durante os processos de conservação de bambu.

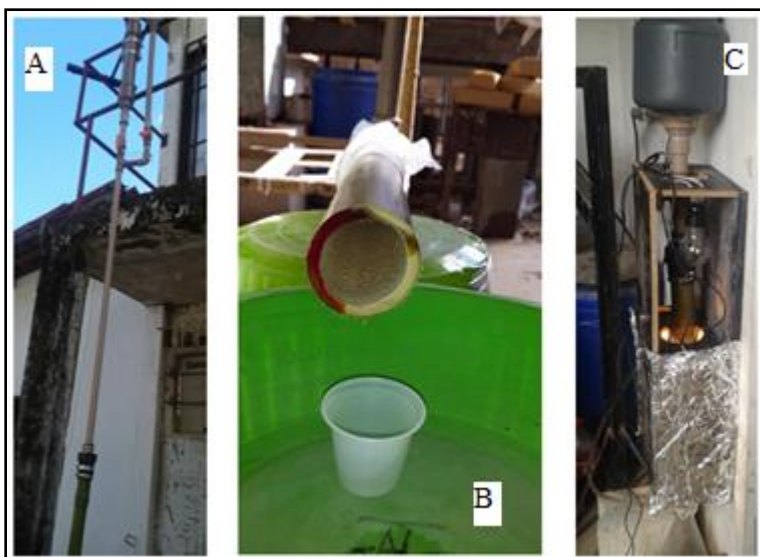
Figura 3-54. Cortes transversais do colmo de *B. vulgaris* infiltrado com solução alcalina e tingido com fenolftaleína.



Fonte: Própria-

Na Figura 3-55, se apresentam diferentes alternativas para o sistema de infiltração de substâncias sob pressão utilizados neste trabalho, na direção vertical (A), horizontal (B) e vertical com aquecimento por lâmpadas (C). Em todos os sistemas propostos se alcançou a passagem de líquidos, embora tal fato não tenha sido possível em todas as amostras ensaiadas. Dessa forma, cumpre remarcar a importância de padronizar o método de infiltração para impregnação de polímeros em grande escala, já que as análises apontaram para ótimos resultados de resistência mecânica e de redução na absorção de água, nas amostras de bambu *B. vulgaris* estudadas ao longo desta tese.

Figura 3-55. Sistemas de infiltração de substâncias sob pressão.



Fonte: Própria-

Embora existam dificuldades para se obter um fluxo contínuo de substâncias no interior do colmo de bambu, algumas peças com diferentes tratamentos foram armazenadas durante um ano nas condições de laboratório no LABEME da UFPB. Na Figura 3-56 referente às amostras naturais, sem nenhum tratamento, observou-se uma degradação intensa quando comparada com as demais amostras que haviam sido tratadas.

Figura 3-56. Fotografias dos colmos na condição natural e infiltrados sob pressão com diferentes tratamentos.



Fonte: Própria-

Cortes cilíndricos dos colmos de *B. vulgaris* foram expostos às intempéries durante 6 meses, tempo durante o qual só as amostras impregnadas com copolímeros SM e SMB resistiram à água e do sol, como se apresenta na Figura 3-57. Embora tenham sido observados alguns sinais de aparição de fungos e de ataque de insetos, as amostras tratadas mostraram maior resistência à degradação enquanto que as outras foram descartadas por total degradação.

Figura 3-57. Fotografias de cortes cilíndricos de colmos impregnados com SM e SMB deixados à intempérie por 6 meses .



Fonte: Própria-

CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES

A cinética da reação de polimerização a baixas taxas de conversão, medida por meio de um dilatômetro de capilar, e apoiada no método Kezdy-Swimbourne, permitiu avaliar o tempo necessário para obter os diferentes homopolímeros e copolímeros. A adição de acrilato de butila diminuiu a constante cinética, k_d , inclusive nas misturas binárias, com exceção no SMB. Como iniciador foi utilizado o PBO em 1% de concentração, embora tenha-se obtido uma diminuição de 22% com a duplicação do PBO, e de 47,5% ao se aumentar em quatro vezes a concentração, porém, optou-se por polimerizar as amostras com 1% de PBO, devido à formação de bolhas no material polimérico causadas pelo efeito gel Trommsdorff – Norrish.

A polimerização do SMB em diferentes temperaturas, 40°C, 50°C e 60°C, utilizando tolueno como solvente, mostrou que os tempos para atingir 80% da conversão foram 448h, 262h e 8h, respectivamente. No entanto, na polimerização sem tolueno, as amostras a 60°C apresentaram formação de bolhas, após 2 h de reação.

O grau de conversão, medido em função da precipitação de sólidos dos polímeros a 60°C e com 1% de PBO, confirmou os resultados obtidos por dilatometria. O avanço de reação de 20% foi atingido aproximadamente nas primeiras 2 h de reação e 80% cerca das 12 h. As viscosidades das misturas dos copolímeros em polimerização se relacionaram com o avanço da reação, encontrando-se que as amostras com aproximadamente 20% de conversão alcançam viscosidade de 0,3 Pa.s, na qual ainda se pode realizar a infiltração das substâncias no material lignocelulósico do bambu.

O uso de monômeros de acrilato de butila em misturas com estireno e metacrilato de metila 1:2:2, respectivamente, aportou duas modificações nas propriedades do terpolímero SMB a primeira, foi a diminuição da sua temperatura de transição de vítrea (T_g) para 63°C e a segunda, foi reduzir a rigidez do copolímero SM, embora tenha sido observado um decréscimo no valor da tensão máxima em comparação com os homopolímeros e o SM. O SMB apresentou valores de resistência à compressão axial superiores a 90 MPa, apresentando um comportamento plástico ao contrário dos homopolímeros, PSt e PMMA, e do copolímero SM.

A infiltração de substâncias dentro de colmos de bambu *B. vulgaris* utilizando-se um sistema de pressão tipo Boucherie, mostrou a dificuldade de se ter um fluxo homogêneo através dos tecidos internos do bambu. Visto que a complexa estrutura interna do bambu limita o fluxo de produtos nele injetados não foi possível obter uma população de resultados estatisticamente homogêneos, razão pela qual se optou por adaptar as normas ASTM 1413-99 e ASTM 143-09 nesta tese.

O uso da norma ASTM 1413-99, que trata da infiltração de pequenas amostras preparadas adaptando-se a norma ASTM 143-09, permitiu manter um maior controle sobre as variáveis de infiltração das amostras. Assim, obteve-se uma maior homogeneidade dos resultados em função do coeficiente de variação.

As medidas do diâmetro do metaxilema sobre os cortes transversais das amostras naturais indicaram valores entre 35 e 180µm. A análise da variação do diâmetro do metaxilema, após as infiltrações com soluções fixadoras de tecido, permitiu identificar que as amostras infiltradas com solução de glutaraldeído mostraram maior aumento no diâmetro do que as infiltradas com solução FAA.

A infiltração com a solução GA a 2,5% causou expansão da espessura das amostras entre 3,3% e 4,1%, e as amostras pré-tratadas com GA e impregnadas com SM, entre 2,5% e 3,0% e aquelas denominadas de GA-SMB, entre 1,70% e 2,29%. Por outro lado, a impregnação com SM causou uma retração entre 4,1% e 4,7%.

A expansão na largura dos corpos de prova das amostras, GA, GA-SM e GA-SMB, em média foi de 3,6%, 2,3% e 2,0%, respectivamente, enquanto que as amostras com SM apresentaram 4,1% de retração. Como consequência, o volume apresentou a mesma tendência, sendo que as primeiras amostras aumentaram em média 8,87%, 5,3% e 4,91%, respectivamente, enquanto que as amostras impregnadas com SM mostraram retração de 10,2%.

As mesclas poliméricas foram pre-iniciadas por 1 h a 60°C para logo serem infiltradas adaptando-se a norma ASTM 1413-99. Segundo os resultados, a massa das amostras infiltradas com solução GA e dos espécimens impregnados só apenas com SM, diminuiu em 8,1% e 12,8%, respectivamente, e aumentou para as amostras GA-SM e GA-SMB em 9,7% e 11,4%, respectivamente. Embora os valores obtidos sejam relativamente baixos, deve-se considerar que no processo de infiltração dos monômeros ocorre perda de parte da massa original do bambu por lixiviação de produtos de seu interior.

O ensaio de compressão paralela às fibras (Cp) mostrou que todos os processos realizados sobre as amostras aumentaram o valor de resistência máxima com respeito à natural. O aquecimento aumentou a resistência à compressão paralela às fibras em 13,1%, a infiltração com GA em 24,0%, a impregnação com SM sem infiltração de GA em 31,7, e as impregnadas com SM e SMB pré-infiltradas com GA em 48,6 e 48,3, respectivamente. Tal fato indica que cada processo aporta uma modificação específica ao valor de resistência à compressão. O mesmo comportamento se encontrou no incremento do MOE, sendo que as variações mais elevadas foram apresentadas pelas amostras pré-infiltradas com GA e impregnadas com SM e SMB, as quais foram de 53,2% e 51,5%, respectivamente. Também se encontrou que cada tratamento aporta um incremento no valor final do MOE. O uso do acrilato de butila não aumentou o valor do módulo de elasticidade.

O ensaio de compressão perpendicular às fibras dos corpos de prova mostrou que a infiltração com GA e a impregnação com SM sem pré-tratamento diminuíram o valor da resistência máxima, em 4,3% e 5,4%, respectivamente, enquanto que o aquecimento aumentou-a em 28,05%, e as impregnações com SM e SMB com pré-infiltração de GA aumentaram o valor em 35,3 e 37,9% respectivamente. O valor do módulo de elasticidade manteve o mesmo comportamento com o atenuante de apresentar um incremento de 15,5%, valor mais do que duas vezes superior aos outros obtidos, o que poderia indicar que o acrilato de butila funcionou como agente plastificante.

A resistência máxima e o MOE em flexão foram incrementados após a aplicação de todos os processos descritos neste trabalho. O aquecimento incrementou-os em 8,68% e 17,4%; a infiltração com GA em 6,4% e 13,2%; a impregnação com SM sem GA em 7,3% e 20,9%; a infiltração com GA e impregnação com SM em 16,6% e 30,7%, enquanto que a

preinfiltrada e com SMB em 20,9% e 30,6%. O uso do acrilato de butila não modificou o valor do MOE em relação à impregnação com SM.

A percentagem de absorção da água das amostras apresentou diferenças de acordo com o tratamento durante os 30 dias da avaliação. As amostras naturais (BN) massa em 47%, enquanto que as testemunhas térmicas tiveram aumento de 62,2%, as amostras infiltradas com solução GA em 33,3%, as amostras com impregnação de SM em 27,7%, e as impregnadas com SM e com SMB, após da infiltração com GA, em 21,5 e 19,5%, respectivamente. Tal fato que as amostras com impregnações de polímeros mostram diminuição absorção de água.

Verificou-se que nas amostras naturais (BN), o maior inchamento ocorre em na espessura, atingindo 21,9% contra 12,3% na direção da largura. O mesmo comportamento foi observado em todos os grupos de amostras exceto para as amostras BT, que apresentaram maiores valores de inchamento. Foram observadas as menores variações dimensionais nas amostras BGA-SM e BGA-SMB, cujos incrementos na largura foram de 9,2% e 9,8%, enquanto que na espessura foram de 14% e 13,1%, respectivamente. Dessa forma, observou-se que as impregnações com polímeros chegaram a diminuir em 25% o inchamento na face tangencial, e em 40% na face radial. O incremento em volume das amostras umedecidas também mostrou a mesma tendência, chegando-se a reduzir em 31% o inchamento volumétrico.

As imagens obtidas a partir do microscópio óptico permitiram observar algumas regiões com impregnação de polímeros, especialmente quando se realizou o tingimento do tecido com azul astra. As microfotografias obtidas por MEV permitiram inferir que os polímeros foram armazenados principalmente nos vasos do metaxilema e do floema. Durante a obtenção das imagens o feixe de elétrons tende a degradar os polímeros motivo pelo qual as imagens não foram muito claras, e os vapores gerados podem ter causado danos ao filamento de tungstênio do aparelho, de forma que seria melhor trabalhar no modo ambiente e não no modo vácuo.

A análise por difração de raios-X indicou que as amostras naturais do *B. vulgaris* tem um grau de cristalinidade (GC) de 55%, e a infiltração com solução GA a elevou para 66,5%,

o que explica em parte a redução na absorção de água. Por outro lado, as impregnações com SM e SMB, com e sem pretratamento com GA, apresentaram valores de GC próximos a 48%. No entanto, não se percebeu a relação desses últimos com a absorção de água, já que apesar de diminuir o GC, as amostras diminuíram a absorção de água, o que será relacionado à natureza amorfa dos copolímeros.

Os termogramas das amostras impregnadas e denominadas como BSM, BGA-SM e BGA-SMB apresentaram curvas híbridas entre aquelas encontradas para o material lignocelulósico e para os polímeros, cujos picos endotérmicos apareceram na faixa entre 348,7°C e 371,9 °C.

As curvas de DTGA permitiram identificar que as amostras infiltradas com GA apresentaram um deslocamento do pico em 317,5°C, o qual, além disso exibiu uma pequena depressão. As amostras impregnadas com copolímeros, BSM, BGA-SM e BGA-SMB., apresentaram um novo pico próximo a 407°C, pico que já tinha sido observado nos termogramas dos polímeros.

Os espectros na região do infravermelho mostraram as modificações que o material lignocelulósico sofreu com os processos químicos. Os picos em 1732 cm⁻¹, devido ao alongamento do grupo carbonila (C=O), e em 1203 cm⁻¹, devido ao alongamento do grupo C-O, assim como os picos em 694cm⁻¹ e em 787cm⁻¹, devidos à deformação dos grupos C-H e à deformação causada pela ressonância do anel de benzeno do estireno, confirmaram a presença dos copolímeros, SM e SMB, nas amostras impregnadas.

Em geral, a impregnação do bambu *B. vulgaris* com os copolímeros poli(St-co-MMA) e poli(St-co-MMA-co-BUA) melhorou as propriedades mecânicas e diminuiu a absorção de água pelo material natural, quando foram feitas as impregnações após o processo de infiltração com solução GA a 2,5%. O uso de acrilato de butila nos copolímeros não propiciou diferenças significativas nos módulos de elasticidade, porém sim na resistência máxima das pequenas amostras impregnadas.

Recomendações para trabalhos futuros

- Realizar novos ensaios aumentando-se o tempo de infiltração para se verificar se a quantidade de material impregnado pode ser aumentada.
- Realizar análises analíticas do parênquima para se verificar se ocorre a presença dos polímeros impregnados também nesses tecidos do bambu.
- Fazer impregnação de polímeros misturados com solventes, que permitam obter-se redução de viscosidade e maior aderência com o material vegetal.
- Analisar as substâncias lixiviadas durante o processo de impregnação.
- A partir da experiência deste trabalho, aprimorar um sistema que permita impregnar colmos longos de bambu.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abang A. (1984). Development of Basic Mechanical Tests for Malaysian Bamboos. *Pertanika* 7(2), 13-17.
- AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Normas Colombianas de Diseño Sismo Resistente. (NSR-10)*. Bogotá.
- Anwar, O.M.K., Paridah, M.T., Hamdan, H., Sapuan, S.M. e Bakar, E. J. (2009). Effect of curing time on physical and mechanical properties of phenolic – treated bamboo strips. *Industrial crops and products*, 29, 214-219.
- Anusavice, K. J., 2004. *Phillips la ciencia de los materiales dentales*. Elsevier España.
- Arce Oscar (1995). Bamboo Housing in Seismic-prone Areas. Bali-India. 19-22 de junho. Ed. Thomson Press Ltda. Disponível em:
https://idl-bnc.idrc.ca/dspace/bitstream/10625/35933/1/106735_v3.pdf
- ASTM D143-09. (2009). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. In: *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1413-99 (1999). Standard Test Method for Wood Preservatives by Laboratory Soil-Block Cultures. In: *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA.
- Baysal, E., Yalinkilic, M.K., Altinok, M., Sonmez, A., Peker, H., e Colak, M. (2007). Some physical, biological, mechanical and fire properties of wood polymer composite (WPC) pretreated with boric acid and borax mixture. *Construction and Bulding Materials*. 21. 1879-1885.
- Beauchemin R.C. e Dubé M.A.(1999). Bulk terpolymer composition prediction from copolymer reactivity ratios *Polymer reaction engineering*, 7(4), 485-499.
- Beraldo, A. L. Bambucreto- o uso do bambu como reforço do concreto (1987). In: Anais do XVI- CONBEA, Jundiaí, SP, p. 521-530
- Billmeyer, F.W. Jr. (1984). *Textbook of the polymer science*. 3rd Edition. Wiley – interscience. New York.
- Bing Meng, Jingjing Deng, Qiing Liu, Zhihua Wu e Wei Yang (2012). Transparent and ductile poly(lactic acid)/poly (butyl acrylate) blends: structure and properties. *European Polymer Journal*. 48. 127-135.

Brar A.S., e Satyanarayana C.U.V. (1992). Microstructure determination of Styrene-butyl acrylate copolymers by NMR-spectroscopy. *Polymer Journal*. 24 (9) 879-887.

Cerrada M.L., Fuente J. L. de la, Fernandez – García M. e Madruga E. L. (2001). Viscoelastic and mechanical properties of poly(butyl acrylate-g-styrene) copolymers. *Polymers*. 42. 4647-4655.

Ciolacu D., Ciolacu F. e Popa V. (2011) Amorphous cellulose—structure and characterization. *Cellulose Chemistry and Technology*. 45. 13-21.

Curteanu, S. e Bulacovschi V. (2004). Empirical models for viscosity variation in bulk free radical polymerization. *Chem. Ind.* 58 (9) 393-400.

Dixon P. G. e Gibson L. J.. (2014). The structure and mechanics of Moso bamboo material. *J R Soc Interface* 11. DOI: 20140321

Dumar Lobo, Jorge (2014). Determinación de la variación de la resistencia a flexión y módulo de elasticidad longitudinal de la *Guadua angustifolia* Kunth, con el contenido de humedad. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Espelho, J.C.C. (2007). *Tratamento químico de colmos de bambu pelo método de Boucherie modificado*. Disertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. SP. Brasil.

Espinel C.F., Martinez Covaleta H.J., e Pinzón Ruíz N. (2005). *La cadena de la guadua en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005*. Min. Agricultura y desarrollo rural.

Fernandez–Garcia M., Cuervo–Rodriguez R., e Madruga I. (1999). Glass transition temperatures of butyl acrylate–methyl methacrylate copolymers. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 37, 2512–2520.

Flores Manrique Nadia Magali (2011). *Efectos del tratamiento químico en las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de la Musa paradisiaca L. para refuerzos en composites*. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de ciencias químicas y ambientales. Guayaquil. Ecuador.

García-García, Lucia; Bordallo-López, Eduardo; Dopico-Ramírez, Daisy; e Cordero-Fernández, Dolores (2013). *Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana, Cuba. vol. 47, núm. 1, enero-abril. 57-63.

Gebizlioglu O.S., Beckman H.W., Argon A.S., Cohen R.E e Brown H.R.(1990). A new mechanism of toughening glassy polymers. *J. Experimental Procedures Macromolecules*. 23. 3968-3974.

George P., S., Charles L., B., Stuart R., A., Sara S. e Graham W. (1998). Dielectric relaxation spectroscopy of a styrene/ n-butyl methacrylate copolymer series. *Polymer*. Vol. 39 No. 24. 5929–5937.

Gloaguen J. M., Escaig B., e Lefebvre J. M. (1995). Plasticity of styrene-co-methylmethacrylate random copolymers. *Journal of materials science* 30. 1111-1116.

Gnanaharan, R. (2000). *Preservative treatment methods for bamboo: A review. Part - II of bamboo shelter: A demonstration of best construction practice*. (KFRI Research Report No: 177(II): 19p.

Gomez-Biedma, S.; Vivo, M. e Soria, E. (2001). Pruebas de significación en Bioestadística. *Rev Diagn Biol.*, vol.50, n.4, 207-218.

Gomes Neto J. A. (2017). Painele modular de matriz cimentícia com reforço estrutural de *B. vulgaris*. Dissertação de tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia civil. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. Brasil.

Gonzalez Y., Mora N., e Molina Y. (2009). Preservación de *B. vulgaris* Schrad ex Wendl mediante métodos sin presión. *Revista Forestal Venezolana*, año XLIII, vol 53. Enero-Junio. 43-50

Gonçalves Mothé.C., e Damico de Azevedo A.D. (2009). *Análise térmica de materiais*. São Paulo. Artliber Editora Ltda.

Guimarães Mario (2013). Estudo da modificação química de polpa kraft de bambu com dianidrido 3,3',4,4' benzofenona tetracarboxílico. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14(1), 196-205.

Guimarães Mario, Botaro Vagner Roberto, e Monteiro Novack Kátia. (2013). Dimensional stability of *B. vulgaris* for the production of GLB and furniture. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2013, Page 1.

Hiemenz Paul C. (1984). *Polymer chemistry. The basic concepts*. U.S.A.: Ed. Marcel Dekker, INC.361, 36. Ibrahim, B. e Kadum, K. M., (2012). Morphology Studies and Mechanical Properties for PS/SBS Blends. *Int. J. Eng. Technol.* 12 (3), 19-27.

Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., e Cardona, F.,(2012). Chemical Treatments on Plant-based Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: An Overview, *Composites: Part B*, DOI: [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.compositesb.2012.04.053](http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053).

Kaniappan K. e Latha S. (2011). Certain Investigations on the Formulation and Characterization of Polystyrene / Poly(methyl methacrylate) Blends. *International Journal of ChemTech Research*. Vol 3. (2), 708-717.

Kelchner S.A. and Bamboo Phylogenic Group. (2013). Higher level phylogenetic relationships within the bamboos (Poaceae:Bambusoideae) based on five plastid markers. *Molecular Phylogenetic and Evolution* 67.

Kent, J. A. e Riegel`s E. R. (2007). *Handbook of industrial chemistry and biotechnology*. Vol 1. Springer. Pp 63.

Keplinger Tobias; Cabane Etienne; Chanana Munish; Hass Philipp; Merk Vivian; Gierlinger Notburga; e Burgert Ing. (2015). A versatile strategy for grafting polymers to wood cell walls. *Acta biomaterialia*. 11(1):256-263. DOI:10.1016/j.actbio.2014.09.016

Kricheldorf Hans R., Oskar Nuyken , e Swift Graham (2004). Chapter 2. Polystyrenes and Other Aromatic Poly(vinylcompound)s. *Handbook of Polymer Synthesis*. CRC Press. Second. Edition. Edited Print ISBN: 978-0-8247-5473-0.

Krishnamurthy K.V. (1999). *Methods in cell wall cytochemistry*. Boca Raton, Florida. U.S.A. CRC Press. ISBN:0-8493-0729-5. 336p.

Kumar A., e Gupta R,K., (2003) *Fundamentals of Polymer Engineering*. New York USA: Marcel Dekker. Cap. 14, 578-580.

Kwon Tae Seok, Kondo Shuji, Kunisada Hideo e Yuki Yasuo (1998). Synthesis of polystyrene and poly (methyl methacrylate) each with a Phenyl Seleno group at terminal chain end by radical polymerization in presence of Benzyl Phenyl Selenide as a photoiniferter. *Polymer Journal*. Vol. 30, No 7, 559-565.

Lapman Steve. (2003). *Characterization and failure analysis of plastics*. 1ª Edición. ASM International. Ohio. U.S.A. 131-134.

Leskovac Mirela, Kovacevic Vera, Fles Draquatin e Hace Drago (1999). Thermal stability of poly(methyl methacrylate-co-butylacrylate) and Poly (styrene-co-butyl acrylate) polymers. *Polymers Engineering and Science*. 39 (3), 600-608.

Li M. F., Fan Y. M., Xu F., Sun R. C., e Zhang X. L. (2010). Cold sodium hydroxide/urea based pretreatment of bamboo for bioethanol production: characterization of the cellulose rich fraction. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 551-559.

Liese, W. (2004). A preservação do colmo de bambú com relação a sua estrutura. Conferência apresentada no Simposio Internacional Guadua. Pereira.Colombia. Tradução do Professor Antonio L. Beraldo, Feagri. Brasil. Recuperado el 25 de marzo de 2014, de <http://www.apuama.org/wp-content/uploads/2012/04/LIESE-Preserva%C3%A7%C3%A3o-do-colmo-do-bambu.pdf>

Liese, W. e Ding, Y. (2003). *Structure and functions of the nodes in bamboo. Recent advances in bamboo research*. 193-199 ISBN 81-7233-318-8

Liese, W. (1998). The Anatomy of Bamboo Culms. INBAR Technical Report N° 18. *International Network for Bamboo and Rattan*, Beijing. P204.

Liese, W. (1994). Biological aspects of Bamboo and Rattan for quality improvement by polymer impregnation. *Folia Forestalia Polonica*. Serie B. 43-56.

Liu, K., Takagi, H., Osugi, R., e Yang, Z. (2012). Effect of physicochemical structure of natural fiber on transverse thermal conductivity of unidirectional abaca/bamboo fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1234-1241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.02.020>.

Lobo J.D. (2014). *Determinación de la variación de la resistencia a flexión y módulo de elasticidad longitudinal de la guadua angustifolia Kunth, con el contenido de humedad*. Disertación tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

Lybeer Bieke, Koch Gerald, Van Acker Joris, e Goetghebeur Paul. (2006) Lignification and Cell Wall Thickening in Nodes of *Phyllostachys viridiglaucescens* and *Phyllostachys nigra*, *Ann Bot*. April; 97(4): 529–539. doi: 10.1093/aob/mcl016).

Lux Alexander. (s.a.). *Manual de microscopia eletrônica ultraestrutura y citología vegetal*. Universidad de Bratislava. Checoslovaquia. Vol1. Traducido. Facultad de Ciencias Biológicas. División de estudios de posgrado. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Mathur V, e Sharma K.,(2013). Evaluation of morphological effect on thermal and mechanical performance of PS/PMMA/CdS nanocomposite systems. *Adv Nanoparticles*; 2: 205–216.

Mahato D.N., Mathur B.K. e Bhattacharjee S. (2013). DSC and IR methods for determination of accessibility of cellulosic coir fibre and thermal degradation under mercerization. *Indian Journal of fiber and textile research*, 38. 96–100

Manrich Silvio. (2005). *Processamento de termoplásticos*. São Paulo. Artliber Editora. Cap 1 Pp 55.

Mbugue, Duncan O (2000). Mechanical properties of bamboo (*B. vulgaris*) grown in Muguga, Kenya desde <http://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/19715>

Montoya Arango, J.A (2008). Evaluación de métodos para la preservación de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*. XIV. (38). Universidad Tecnológica de Pereira.

Morais V., Encinar M., Prolongo M G., e Rubio R. G. (2006). Dynamical mechanical behavior of copolymers made of styrene and methyl methacrylate: Random, alternate and diblock copolymers. *Polymer*, Volume 47, Issue 7, 2349-2356.

Morita M e Sakata I., (1991) Polymer distribution in the cell-wall of a wood polyethylenimine composite. *Wood Sci. Technol.* 25(3):215–224.

Morán, J. (2008). Extracción de celulosa y obtención de nanocelulosa a partir de fibra Sisal- Caracterización. Asociación Argentina de Materiales. 2º encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Posadas, Misiones. Recuperado de: http://www.materialessam.org.ar/sitio/biblioteca/jovenesSAM08/Trabajos_completos/14.Materiales%20Nanoestructurados/14067MoranJ.pdf

Nazir, M.S., Wahjoedi, B.A., Yussof, A.W., e Abdullah, M.A. (2013). Eco-Friendly Extraction and Characterization of Cellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunches. *Bioresources*, 8(2), 2162-2172.

Neves S., Calado V., Rodriguez R.J.S., e Margem F. (2012). Thermogravimetric Stability of Polymer Composites Reinforced with Less Common Lignocellulosic Fibers – an Overview. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 1, Issue 2, July–September, Pages 117-126

Nguyen H. D., Thuy Mai T. T., Nguyen N. B., Dang T. D., Phung Le M. L., e Dang T. T.(2013). A novel method for preparing microfibrillated cellulose from bamboo fibers, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 4, no. 1. 1-9.

Odian G. (1991). *Principles of Polymerization*, 3rd ed., John Wiley & Son. New York . USA.

Ortigosa Stolf Denise e Rocco Lahr Francisco Antonio. (2004). Wood-polymer composite: Physical and mechanical properties of some wood species impregnated with styrene and Methyl Methacrylate. *Materials and Research*. 7 (4), 611-617.

Osorio S., J.A., Espinosa Bedoya A., e García Galeano E.A. (2009). Evaluación de las propiedades mecánicas de la estructura interna de la Guadua con un modelo matemático. *Dyna*, año 76, nro. 160, Medellín, 169-178.

Osorio S., J.A., Velez J. M. e Ciro H. J. (2007a). Estructura interna de la Guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas. *Dyna*, Año 74 No 153, 81-94.

Osorio S., J.A., Velez J. M. e Ciro H.J. (2007b). Determinación de la relación de Poisson de la Guadua angustifolia Kunth a partir de procesamientos de imágenes y su relación con la estructura interna. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*.Vol.60,No.2, 4067-4076.

Osorio S., Jairo Alexander; Ciro V., Héctor José e Velez R., Juan Manuel. (2005). Influencia de parámetros físicos en la resistencia de diseño a compresión de la guadua angustifolia kunth. *Dyna rev.fac.nac.minas*. vol.72, n.147, 1-6.

Panoli O., Martins R., Romani Enric C., Paciornik S., Lopes Alves H., Pinho de M.H., Fatima Ventura F., Lobo L., Neumann G.B., e Khosrow G. (2015). Microtomography study of bamboo impregnated with silver nanoparticles (Ag-NPs).Trabalho apresentado no16th congresso Nocmat no Canada. Disponível em:
https://umanitoba.ca/faculties/engineering/departments/ce2p2e/alternative_village/media/16th_NOCMAT_2015_submission_144.pdf

Peña V. Luis, Burgos Amarilis. González F. Aura e Valero Styles Will., (2009). Efecto de la preservación con mezclas de bórax-ácido bórico y urea formaldehído sobre las propiedades físico mecánicas y el ataque de insectos en guadua (*Guadua angustifolia* Kunth). *Revista Forestal Venezolana*, Año XLIII, Volumen 53(2) Julio-Diciembre, 2009,135-144

Pereira, M. A. R. e Beraldo, A. L. (2008). Bambu de corpo e alma. Bauru, SP: Canal 6 Projetos Editoriais. 240 p.

Preechatiwong W., Malanit P., Kyokong B. e KamLangdee N. (2006). Effects of polymer impregnation on properties of bamboo. *Walailak J. Sci. &Tech.*; 3(1): 79-91.

Prieto A., R. (2004). *Optimización de unión en guadua ante solicitud de fuerza sísmica*. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Bucaramanga. Colombia.

Primo Y., E., (1996). *Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria*. Tomo 1. Universidad Politécnica de Valencia. Reverte. Barcelona. España.

Qisheng, Z.; Shenxue, J; Yongyu, T. (2002). Industrial utilization on bamboo. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan. (Nota Técnica).

Rashmi R. Devi, Ilias Ali, e Maji T.K. (2003). Chemical modification of rubber wood with styrene in combination with a crosslinker: effect on dimensional stability and strength property. *Bioresource Technology* 88. 185–188

Rawe, A., (2000). *Principles of polymers chemistry*. Vol 1. 2nd edition. Springer. U.S.A. 622 p.

Reyes Ortiz S. P. (2017). Efecto de la impregnación con polímeros sobre las propiedades mecánicas de la guadua angustifolia. Tesis de doctorado. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica e Mecatrónica. Bogotá-Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

Roos S. G., Müller A. H. E. e Matyjaszewski K. (1999). Copolymerization of n-butylacrylate with methyl methacrylate and pmma macromonomers: comparison of reactivity ratios in conventional and atom transfer radical copolymerization. *Macromolecules* .32. 8331-8335.

Roshan Paul. (2014). *Functional finishes for textiles: Improving comfort, performance and protection*. Publishing Elsevier Science & Technology, Cambridge, United Kingdom.

Runumee D. Borthakur e P.K. Gogoi, 2014. Studies of Dimensional Stability, Thermal Stability and Biodegradation Resistance Capacity of Chemically Treated Bamboo. *Asian Journal of Biochemistry*, 9: 16-29.

Sanchez-Echeverri L.A e Rodriguez García M.E. (2011). Determinación del contenido de fibra insoluble en Guadua angustifolia Kunth. *Fuente:*<http://www.academia.edu/7348996>

Saiful Islam M., Hamdan S., Jusoh I., Rezaur Rahman M., e Ahmed A.S. (2012). The effect of alkali pretreatment on mechanical and morphological properties of tropical Wood. *Polymer Composites*. 33, 419-424.

Sandoval, E. (2005). *Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal*. Cuadernos 38. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. 278 páginas.

Saurina, J., Melchor, V., Berlanga, R., Arnau, J., Jover A. e Suñol J. (1998). Metodología de trabajo en el tratamiento de madera arqueológica subacuática. *Información Tecnológica*. 9 (6).

Simarani K., Hassan M.A., Abd-Aziz S., Wakisaka M. e Shirai Y., (2009). Effect of palm oil mill sterilization process on the physicochemical characteristics and enzymatic hydrolysis of empty fruit bunch. *Asian Journal of Biotechnology*, 1: 57-66.

Sobrinho Jr. A., Marden Torres S., Perazzo Barbosa N., Reyes Ortiz S. P., e Ghavami K. (2012). Impregnation of B. vulgaris with polymeric resins. *Key Engineering Materials* Vol. 517 (2012) pp 27-33 Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.517.27

- Stuart, B. (2002). *Polymer analysis*. Segunda edición. Chichester U.S.A: J. Wiley.
- Schweizer Thomas. (2004). A quick guide to better viscosity measurements of highly viscous fluids. *Applied Rheology*. 14 (4), 197-201
- Takeuchi T. C, P. (2014). *Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural*. Tesis de doctorado en Ingenieria Ciencia y tecnología de los materiales. Universidad nacional de colombia. Diciembre 2014. Bogotá. Colombia.
- Teodorescu M. (2002). Free-radical copolymerization of methyl methacrylate with styrene in the presence of 2-mercaptoethanol. II. Influence of methyl methacrylate/styrene ratio. *European Polymer Journal*.38. 841–846.
- Tommy, Y., Lo, H.Z., e Leung, H.C. (2004). The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. *Materials Letters* 58. 2595– 2598.
- Van Melick H.G.H., Govaert L.E. e Meijer H.E.H. (2003). On the origin of strain hardening in glassy polymers. *Polymer* 44. 2493–2502.
- Vena, P.F., Görgens, J.F. e Rypstra, T. (2009). Hemicelluloses extraction from giant bamboo prior to kraft and soda AQ pulping to produce paper pulps, value-added biopolymers and bioethanol. *Cellulose Chem. Technol.*, 44 (4-6), 153-163.
- Xiaobo, Li. (2004). *Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing*. Dissertation master's degree in science in the school of renewable natural resources. Universidad del Estado de Lousiana.
- Xiaoying D., Yongfeng L., Yunlin F., Jiali G.,e Yixing L.(2012). Characterization and durability of wood-polymer composite prepared by in-situ polymerization of methyl methacrylate and styrene. *Sci. Res. Essays*, 7, 2143-2149.
- Yao Fei, Wu Qinglin, Lei Yong, Guo Weihong e Xu Yanjun. (2008). Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. *Polymer Degradation and Stability*. 93. 90-98.
- Zaragoza-Hernández, Idalia, Ordóñez-Candelaria, Víctor Rubén, Bárcenas- Pazos, Guadalupe Martha, Borja-de la Rosa, Amparo Máxima, e Zamudio- Sánchez, Francisco José. (2015). Propiedades físico-mecánicas de una guadua mexicana (*Guadua aculeata*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(3), 505-516.
- Ziaee F. e Nekoomanesh M. (1998). Monomer reactivity ratios of styrene-butylacrylate copolymers at low and high polymers. *Polymer*. 39 (1), 203-207.

ANEXOS

Anexo A. Análise estatístico por Test t para amostras pareadas

Os resultados da análise estatística são apresentados a seguir, tendo em conta a variável em estudo e o tratamento químico realizado.

Anexo A1. Analise da massa das amostras durante a infiltração com solução FAA

1 Signed Test (04/01/2017 08:13:05)

Notes

X-Function	Signed Test
User Name	ACER PC
Time	04/01/2017 08:13:05
Data Filter	No

Input Data

	Data	Range
1st Data Range	[Book2]Sheet1!B"FAA-Umido"	[1*:9*]
2nd Data Range	[Book2]Sheet1!A"FAA-Natural"	[1*:9*]

Descriptive Statistics

	N	Min	Q1	Median	Q3	Max
"FAA-Umido"	9	3,27	3,405	3,61	3,71	3,82
"FAA-Natural"	9	2,63	2,75	2,89	3	3,03

Frequencies

	N
"FAA-Natural"- "FAA-Umido"	0
Positive Differences	9
Negative Differences	0
Ties	0

Test Statistics

S	Z	Prob> S
0	--	0,00391

Null Hypothesis: $F(x) = G(y)$
Alternative Hypothesis: $F(x) \neq G(y)$
At the 0.05 level, the two distributions are significantly different.

1 Signed Test (04/01/2017 08:15:03)

Notes

X-Function	Signed Test
User Name	ACER PC
Time	04/01/2017 08:15:03
Data Filter	No

Input Data

	Data	Range
1st Data Range	[Book2]Sheet1!C"FAA-Seco"	[1*:9*]
2nd Data Range	[Book2]Sheet1!A"FAA-Natural"	[1*:9*]

Descriptive Statistics

	N	Min	Q1	Median	Q3	Max
"FAA-Seco"	9	2,26	2,325	2,58	2,64	3,02
"FAA-Natural"	9	2,63	2,75	2,89	3	3,03

Frequencies

	N
"FAA-Natural"- "FAA-Seco"	8
Positive Differences	8
Negative Differences	0
Ties	1

Test Statistics

S	Z	Prob> S
8	--	0,00781

Null Hypothesis: $F(x) = G(y)$
Alternative Hypothesis: $F(x) \neq G(y)$
At the 0.05 level, the two distributions are significantly different.

Anexo A2. Analise da massa das amostras durante a infiltração com solução GA

1 Signed Test (04/01/2017 08:16:51)

Notes

X-Function	Signed Test
User Name	ACER PC
Time	04/01/2017 08:16:51
Data Filter	No

Input Data

	Data	Range
1st Data Range	[Book1]Sheet1!B"GA-Úmido"	[1*:9*]
2nd Data Range	[Book1]Sheet1!A"GA-Natural"	[1*:9*]

Descriptive Statistics

	N	Min	Q1	Median	Q3	Max
"GA-Úmido"	9	3,36	3,655	4,13	4,175	4,33
"GA-Natural"	9	2,6	2,725	2,9	2,975	3,02

Frequencies

	N
"GA-Natural"- "GA-Úmido"	0
Positive Differences	0
Negative Differences	9
Ties	0

Test Statistics

S	Z	Prob> S
0	--	0,00391

Null Hypothesis: $F(x) = G(y)$
Alternative Hypothesis: $F(x) \neq G(y)$
At the 0.05 level, the two distributions are significantly different.

1 Signed Test (04/01/2017 08:17:22)

Notes

X-Function	Signed Test
User Name	ACER PC
Time	04/01/2017 08:17:22
Data Filter	No

Input Data

	Data	Range
1st Data Range	[Book1]Sheet1!C"GA-Seco"	[1*:9*]
2nd Data Range	[Book1]Sheet1!A"GA-Natural"	[1*:9*]

Descriptive Statistics

	N	Min	Q1	Median	Q3	Max
"GA-Seco"	9	2,22	2,595	2,71	3,035	3,24
"GA-Natural"	9	2,6	2,725	2,9	2,975	3,02

Frequencies

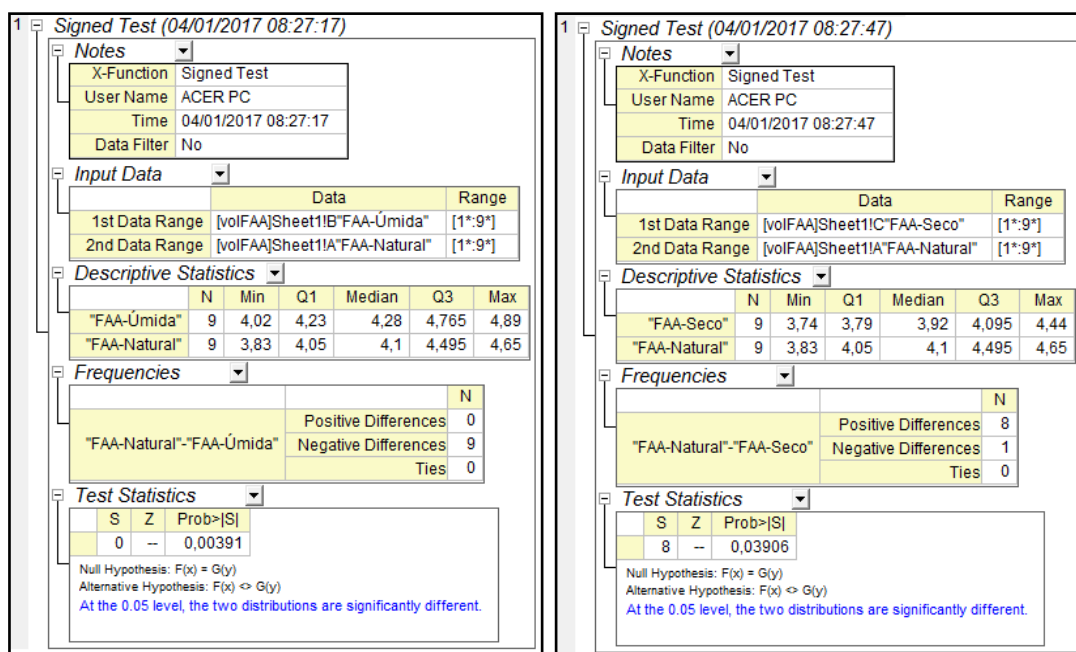
	N
"GA-Natural"- "GA-Seco"	7
Positive Differences	7
Negative Differences	2
Ties	0

Test Statistics

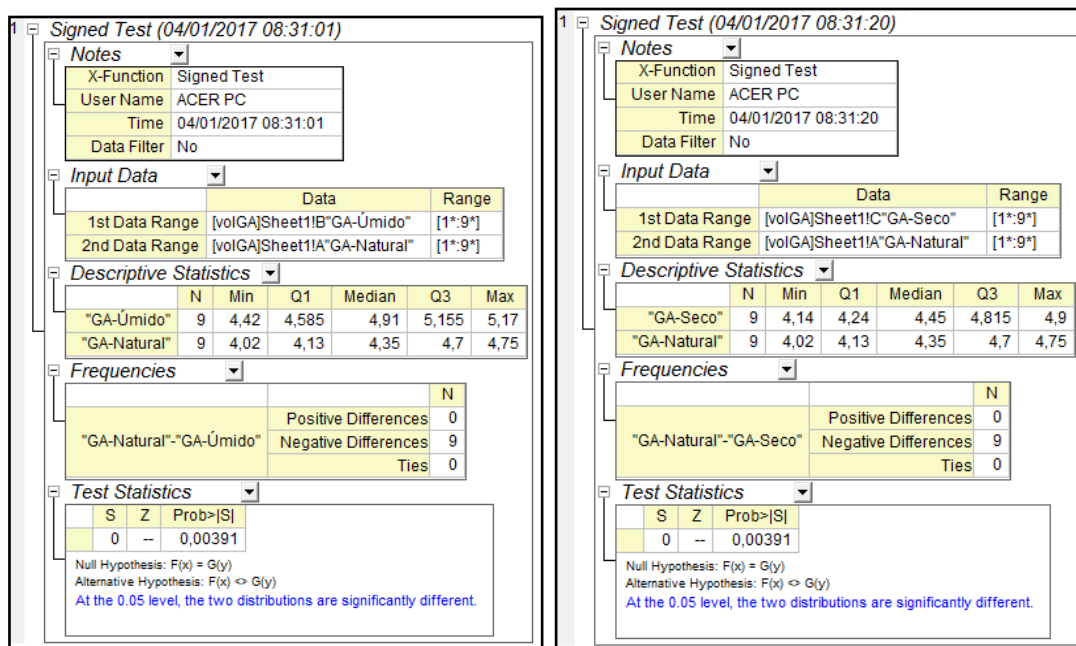
S	Z	Prob> S
7	--	0,17969

Null Hypothesis: $F(x) = G(y)$
Alternative Hypothesis: $F(x) \neq G(y)$
At the 0.05 level, the two distributions are NOT significantly different.

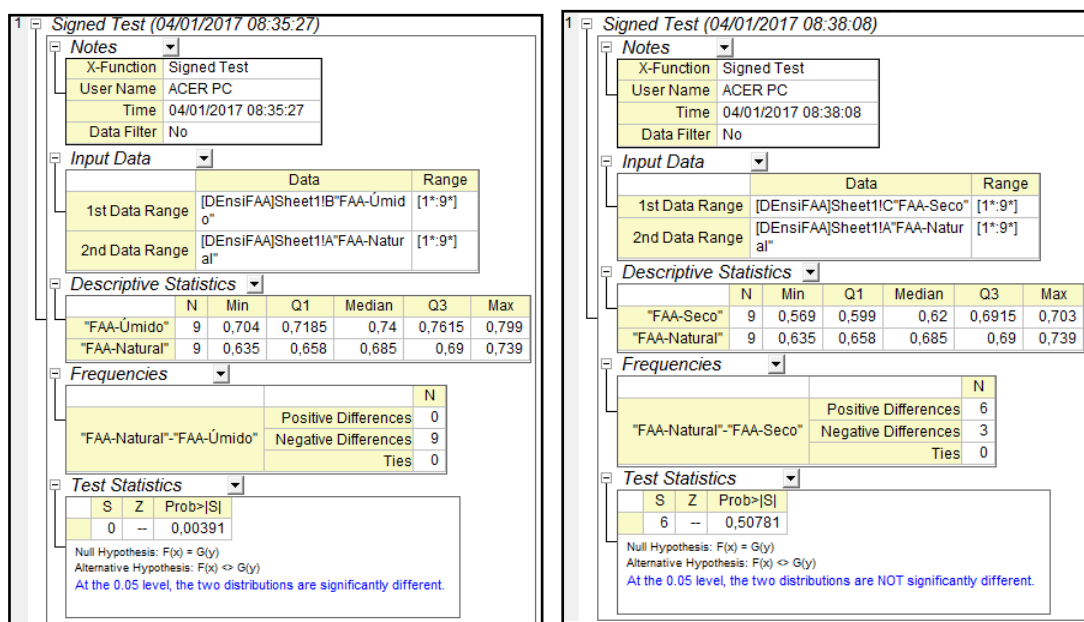
Anexo A3. Análise do volume das amostras durante a infiltração com solução FAA



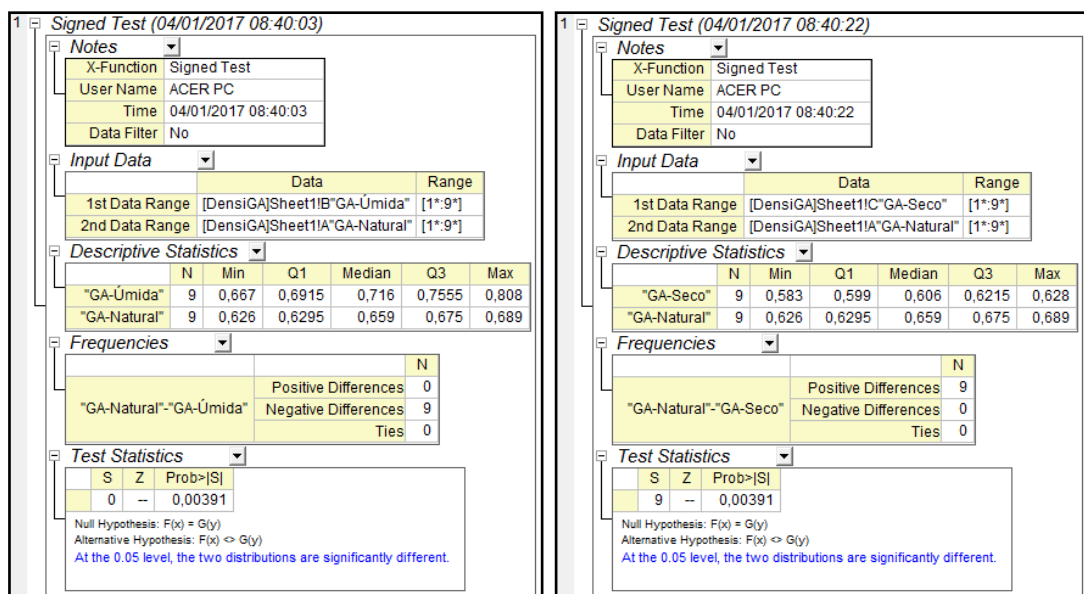
Anexo A4. Análise do volume das amostras durante a infiltração com solução GA



Anexo A5. Análise da densidade das amostras durante a infiltração com solução FAA



Anexo A6. Análise da densidade das amostras durante a infiltração com solução GA



Anexo B.

Os tamanhos dos vasos de xilema foram medidos sobre os cortes transversais dos corpos de prova microfotografiados, usando o software do microscópio Carl Zeiss AxioTech 30. As medidas foram tomadas horizontal e verticalmente sobre o mesmo vaso, antes e depois do tratamento químico.

Anexo B1. Medidas dos metaxilemas dos corpos de prova tratados com solução de glutaraldeído 2,5%.

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA1	136,0	140,0	2,9	125,0	131,0	4,8
	138,0	147,0	6,5	131,0	140,0	6,9
	146,0	149,0	2,1	135,0	143,0	5,9
	139,0	147,0	5,8	143,0	156,0	9,1
	132,0	139,0	5,3	157,0	142,0	-9,6
	165,0	150,0	-9,1	144,0	128,0	-11,1
	183,0	168,0	-8,2	142,0	145,0	2,1
	135,0	149,0	10,4	138,0	153,0	10,9
	146,0	152,0	4,1	138,0	149,0	8,0
Média	146,7	149,0	2,2	139,2	143,0	3,0
σ	16,8	8,4	6,6	9,0	9,3	8,0
C.V	11,4	5,6		6,5	6,5	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA2	142,0	142,0	0,0	130,0	152,0	16,9
	172,0	150,0	-12,8	152,0	148,0	-2,6
	140,0	144,0	2,9	164,0	144,0	-12,2
	154,0	146,0	-5,2	168,0	150,0	-10,7
	160,0	150,0	-6,3	164,0	152,0	-7,3
	136,0	126,0	-7,4	164,0	158,0	-3,7
	120,0	130,0	8,3	180,0	168,0	-6,7
	164,0	162,0	-1,2	180,0	170,0	-5,6
	172,0	174,0	1,2	156,0	176,0	12,8
Média	151,1	147,1	-2,3	162,0	157,6	-2,1
σ	17,8	14,7	6,3	15,2	11,2	10,1
C.V	11,8	10,0		9,4	7,1	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	μm	μm	%	μm	μm	%
BGA3	120,0	133,0	10,8	120,0	120,0	0,0
	148,0	155,0	4,7	143,0	146,0	2,1
	129,0	134,0	3,9	140,0	132,0	-5,7
	135,0	148,0	9,6	143,0	146,0	2,1
	132,0	139,0	5,3	129,0	123,0	-4,7
	140,0	134,0	-4,3	143,0	137,0	-4,2
	111,0	116,0	4,5	137,0	137,0	0,0
	132,0	142,0	7,6	131,0	117,0	-10,7
	143,0	143,0	0,0	135,0	140,0	3,7
Média	132,2	138,2	4,7	135,7	133,1	-1,9
σ	11,4	11,0	4,7	7,9	10,9	4,7
C.V	8,6	8,0		5,8	8,2	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	μm	μm	%	μm	μm	%
BGA4	165,0	160,0	-3,0	123,0	122,0	-0,8
	146,0	149,0	2,1	137,0	140,0	2,2
	143,0	137,0	-4,2	131,0	148,0	13,0
	128,0	128,0	0,0	125,0	128,0	2,4
	131,0	129,0	-1,5	157,0	137,0	-12,7
	134,0	128,0	-4,5	151,0	158,0	4,6
	154,0	143,0	-7,1	143,0	137,0	-4,2
	146,0	140,0	-4,1	137,0	146,0	6,6
	140,0	143,0	2,1	135,0	137,0	1,5
Média	143,0	139,7	-2,3	137,7	139,2	1,4
σ	11,6	10,7	3,2	11,2	10,7	7,1
C.V	8,1	7,7		8,2	7,7	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA5	170,0	176,0	3,5	126,0	136,0	7,9
	154,0	130,0	-15,6	130,0	132,0	1,5
	136,0	134,0	-1,5	126,0	138,0	9,5
	156,0	128,0	-17,9	142,0	136,0	-4,2
	112,0	128,0	14,3	148,0	144,0	-2,7
	138,0	140,0	1,4	152,0	134,0	-11,8
	126,0	140,0	11,1	168,0	152,0	-9,5
	110,0	128,0	16,4	138,0	152,0	10,1
	128,0	143,0	11,7	148,0	162,0	9,5
Média	136,7	138,6	2,6	142,0	142,9	1,1
σ	20,3	15,2	12,5	13,8	10,3	8,6
C.V	14,9	11,0		9,7	7,2	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA6	122,0	142,0	16,4	122,0	134,0	9,8
	120,0	122,0	1,7	120,0	116,0	-3,3
	150,0	122,0	-18,7	80,0	130,0	62,5
	132,0	116,0	-12,1	144,0	134,0	-6,9
	148,0	124,0	-16,2	168,0	128,0	-23,8
	118,0	122,0	3,4	138,0	120,0	-13,0
	110,0	108,0	-1,8	140,0	136,0	-2,9
	126,0	134,0	6,3	136,0	120,0	-11,8
	146,0	124,0	-15,1	132,0	154,0	16,7
Média	130,2	123,8	-4,0	131,1	130,2	3,0
σ	14,6	9,7	12,1	23,7	11,4	25,4
C.V	11,2	7,9		18,1	8,8	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA7	142,0	136,0	-4,2	98,0	116,0	18,4
	148,0	126,0	-14,9	144,0	118,0	-18,1
	126,0	106,0	-15,9	102,0	114,0	11,8
	142,0	138,0	-2,8	132,0	136,0	3,0
	154,0	124,0	-19,5	120,0	132,0	10,0
	106,0	126,0	18,9	118,0	132,0	11,9
	140,0	120,0	-14,3	126,0	122,0	-3,2
	122,0	146,0	19,7	148,0	140,0	-5,4
	120,0	143,0	19,2	126,0	138,0	9,5
Média	133,3	129,4	-1,5	123,8	127,6	4,2
σ	15,6	12,6	16,5	16,8	10,1	11,3
C.V	11,7	9,7		13,6	7,9	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA8	140,0	132,0	-5,7	100,0	112,0	12,0
	132,0	126,0	-4,5	120,0	138,0	15,0
	120,0	130,0	8,3	126,0	124,0	-1,6
	136,0	135,0	-0,7	120,0	139,0	15,8
	116,0	108,0	-6,9	138,0	145,0	5,1
	134,0	139,0	3,7	128,0	142,0	10,9
	138,0	136,0	-1,4	130,0	122,0	-6,2
	121,0	113,0	-6,6	143,0	150,0	4,9
	144,0	138,0	-4,2	132,0	148,0	12,1
Média	131,2	128,6	-2,0	126,3	135,6	7,6
σ	9,9	11,1	5,1	12,4	13,2	7,6
C.V	7,5	8,6		9,8	9,7	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BGA9	131,0	135,0	3,1	153,0	152,0	-0,7
	130,0	125,0	-3,8	134,0	134,0	0,0
	121,0	123,0	1,7	131,0	136,0	3,8
	112,0	127,0	13,4	125,0	139,0	11,2
	128,0	127,0	-0,8	136,0	128,0	-5,9
	136,0	126,0	-7,4	111,0	108,0	-2,7
	116,0	130,0	12,1	109,0	111,0	1,8
	124,0	136,0	9,7	139,0	143,0	2,9
	123,0	133,0	8,1	104,0	98,0	-5,8
Média	124,6	129,1	4,0	126,9	127,7	0,5
σ	7,6	4,6	7,3	16,1	18,1	5,3
C.V	6,1	3,6		12,7	14,1	

Anexo B2. Medidas dos metaxilemas dos corpos de prova tratados com solução FAA.

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA1	116,0	112,0	-3,4	116,0	128,0	10,3
	116,0	112,0	-3,4	136,0	118,0	-13,2
	120,0	114,0	-5,0	118,0	118,0	0,0
	112,0	104,0	-7,1	126,0	118,0	-6,3
	104,0	96,0	-7,7	116,0	110,0	-5,2
	122,0	116,0	-4,9	104,0	110,0	5,8
	116,0	120,0	3,4	144,0	130,0	-9,7
	136,0	122,0	-10,3	136,0	114,0	-16,2
	122,0	122,0	0,0	138,0	104,0	-24,6
Média	118,2	113,1	-4,3	126,0	116,7	-6,6
σ	8,7	8,6	4,1	13,3	8,4	10,9
C.V	7,3	7,6		10,6	7,2	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA2	129,0	125,0	-3,1	126,0	129,0	2,4
	137,0	134,0	-2,2	129,0	129,0	0,0
	123,0	120,0	-2,4	138,0	134,0	-2,9
	118,0	111,0	-5,9	123,0	123,0	0,0
	122,0	125,0	2,5	131,0	134,0	2,3
	132,0	123,0	-6,8	126,0	114,0	-9,5
	140,0	137,0	-2,1	140,0	123,0	-12,1
	134,0	146,0	9,0	111,0	120,0	8,1
	135,0	129,0	-4,4	125,0	123,0	-1,6
Média	130,0	127,8	-1,7	127,7	125,4	-1,5
σ	7,5	10,2	4,8	8,5	6,6	6,2
C.V	5,8	8,0		6,7	5,3	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA3	140,0	128,0	-8,6	151,0	137,0	-9,3
	143,0	140,0	-2,1	138,0	128,0	-7,2
	142,0	134,0	-5,6	143,0	163,0	14,0
	154,0	143,0	-7,1	149,0	160,0	7,4
	157,0	143,0	-8,9	154,0	165,0	7,1
	132,0	146,0	10,6	152,0	149,0	-2,0
	140,0	160,0	14,3	142,0	143,0	0,7
	140,0	160,0	14,3	157,0	154,0	-1,9
	158,0	138,0	-12,7	142,0	131,0	-7,7
Média	145,1	143,6	-0,6	147,6	147,8	0,1
σ	9,0	10,7	10,7	6,5	13,8	8,0
C.V	6,2	7,5		4,4	9,4	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA4	125,0	140,0	12,0	129,0	134,0	3,9
	132,0	143,0	8,3	118,0	134,0	13,6
	143,0	131,0	-8,4	117,0	123,0	5,1
	135,0	112,0	-17,0	146,0	123,0	-15,8
	140,0	131,0	-6,4	157,0	139,0	-11,5
	117,0	132,0	12,8	148,0	143,0	-3,4
	134,0	117,0	-12,7	140,0	131,0	-6,4
	154,0	131,0	-14,9	129,0	142,0	10,1
	125,0	141,0	12,8	137,0	149,0	8,8
Média	133,9	130,9	-1,50	135,7	135,3	0,49
σ	11,0	10,5	12,77	13,6	8,9	10,23
C.V	8,2	8,0		10,0	6,6	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA5	146,0	148,0	1,4	158,0	162,0	2,5
	156,0	150,0	-3,8	148,0	146,0	-1,4
	142,0	162,0	14,1	146,0	146,0	0,0
	136,0	158,0	16,2	144,0	162,0	12,5
	152,0	146,0	-3,9	162,0	160,0	-1,2
	144,0	150,0	4,2	144,0	164,0	13,9
	152,0	170,0	11,8	150,0	162,0	8,0
	160,0	158,0	-1,3	170,0	150,0	-11,8
	156,0	164,0	5,1	170,0	156,0	-8,2
Média	149,3	156,2	4,9	154,7	156,4	1,6
σ	7,8	8,2	7,6	10,6	7,3	8,7
C.V	5,2	5,3		6,9	4,6	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA6	134,0	128,0	-4,5	132,0	124,0	-6,1
	128,0	140,0	9,4	156,0	132,0	-15,4
	124,0	112,0	-9,7	94,0	105,0	11,7
	134,0	144,0	7,5	82,0	76,0	-7,3
	116,0	132,0	13,8	128,0	122,0	-4,7
	112,0	126,0	12,5	126,0	108,0	-14,3
	140,0	116,0	-17,1	86,0	98,0	14,0
	138,0	136,0	-1,4	122,0	140,0	14,8
	154,0	138,0	-10,4	128,0	152,0	18,8
Média	131,1	130,2	0,0	117,1	117,4	1,3
σ	12,8	10,8	11,2	24,5	23,2	13,4
C.V	9,8	8,3		20,9	19,8	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BFAA7	118,0	126,0	6,8	134,0	142,0	6,0
	114,0	110,0	-3,5	128,0	144,0	12,5
	124,0	130,0	4,8	104,0	96,0	-7,7
	124,0	124,0	0,0	134,0	132,0	-1,5
	144,0	122,0	-15,3	130,0	148,0	13,8
	128,0	116,0	-9,4	130,0	140,0	7,7
	124,0	126,0	1,6	148,0	128,0	-13,5
	136,0	124,0	-8,8	128,0	112,0	-12,5
	142,0	128,0	-9,9	136,0	134,0	-1,5
Média	128,2	122,9	-3,7	130,2	130,7	0,4
σ	10,4	6,3	7,5	11,6	16,8	10,3
C.V	8,1	5,1		8,9	12,9	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	μm	μm	%	μm	μm	%
BFAA8	123,0	134,0	8,9	125,0	131,0	4,8
	125,0	132,0	5,6	128,0	126,0	-1,6
	137,0	137,0	0,0	134,0	126,0	-6,0
	114,0	134,0	17,5	134,0	126,0	-6,0
	128,0	123,0	-3,9	134,0	128,0	-4,5
	135,0	123,0	-8,9	131,0	140,0	6,9
	146,0	129,0	-11,6	135,0	115,0	-14,8
	131,0	106,0	-19,1	123,0	145,0	17,9
	128,0	134,0	4,7	137,0	149,0	8,8
Média	129,7	128,0	-0,7	131,2	131,8	0,6
σ	9,1	9,6	11,3	4,8	10,8	9,9
C.V	7,0	7,5		3,7	8,2	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	μm	μm	%	μm	μm	%
BFAA9	112,0	124,0	10,7	152,0	164,0	7,9
	138,0	124,0	-10,1	158,0	168,0	6,3
	153,0	138,0	-9,8	156,0	150,0	-3,8
	145,0	132,0	-9,0	142,0	160,0	12,7
	140,0	132,0	-5,7	168,0	160,0	-4,8
	116,0	116,0	0,0	152,0	148,0	-2,6
	131,0	124,0	-5,3	112,0	128,0	14,3
	130,0	122,0	-6,2	134,0	126,0	-6,0
	136,0	122,0	-10,3	137,0	158,0	15,3
Média	133,4	126,0	-5,1	145,7	151,3	4,4
σ	13,1	6,7	6,8	16,6	15,1	8,7
C.V	9,8	5,3		11,4	10,0	

Anexo B3. Medidas dos metaxilemas dos corpos de prova tratados com solução FAA.

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 1	132,0	132,0	0,0	140,0	140,0	0,0
	136,0	148,0	8,8	148,0	132,0	-10,8
	128,0	108,0	-15,6	122,0	120,0	-1,6
	146,0	122,0	-16,4	130,0	140,0	7,7
	112,0	108,0	-3,6	146,0	146,0	0,0
	104,0	120,0	15,4	156,0	134,0	-14,1
	146,0	142,0	-2,7	154,0	152,0	-1,3
	144,0	134,0	-6,9	146,0	144,0	-1,4
	146,0	134,0	-8,2	134,0	126,0	-6,0
Média	132,7	127,6	-3,3	141,8	137,1	-3,1
σ	15,6	14,1	10,4	11,3	10,1	6,4
C.V	11,8	11,0		8,0	7,4	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 2	120,0	124,0	3,3	114,0	112,0	-1,8
	186,0	154,0	-17,2	142,0	142,0	0,0
	160,0	120,0	-25,0	110,0	112,0	1,8
	176,0	180,0	2,3	176,0	174,0	-1,1
	150,0	162,0	8,0	126,0	120,0	-4,8
	122,0	146,0	19,7	150,0	152,0	1,3
	142,0	168,0	18,3	154,0	136,0	-11,7
	148,0	164,0	10,8	134,0	152,0	13,4
	132,0	156,0	18,2	120,0	140,0	16,7
Média	148,4	152,7	4,3	136,2	137,8	1,5
σ	22,7	19,8	15,8	21,4	20,6	8,7
C.V	15,3	13,0		15,7	14,9	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 3	127,0	123,0	-3,1	124,0	124,0	0,0
	132,0	121,0	-8,3	119,0	131,0	10,1
	128,0	120,0	-6,3	128,0	129,0	0,8
	135,0	132,0	-2,2	114,0	114,0	0,0
	140,0	128,0	-8,6	152,0	129,0	-15,1
	123,0	117,0	-4,9	138,0	118,0	-14,5
	145,0	145,0	0,0	121,0	141,0	16,5
	110,0	119,0	8,2	115,0	104,0	-9,6
	113,0	122,0	8,0	120,0	137,0	14,2
Média	128,1	125,2	-1,9	125,7	125,2	0,3
σ	11,6	8,7	6,3	12,3	11,6	11,8
C.V	9,0	7,0		9,8	9,3	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 4	121,0	122,0	0,8	89,0	93,0	4,5
	120,0	108,0	-10,0	89,0	96,0	7,9
	107,0	110,0	2,8	111,0	114,0	2,7
	123,0	125,0	1,6	124,0	112,0	-9,7
	109,0	106,0	-2,8	118,0	123,0	4,2
	132,0	132,0	0,0	124,0	107,0	-13,7
	128,0	128,0	0,0	133,0	124,0	-6,8
	143,0	130,0	-9,1	137,0	142,0	3,6
	119,0	113,0	-5,0	145,0	148,0	2,1
Média	122,4	119,3	-2,4	118,9	117,7	-0,6
σ	11,1	10,1	4,7	19,7	18,8	7,5
C.V	9,1	8,5		16,6	16,0	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	μm	μm	%	μm	μm	%
BTest 5	112,0	128,0	14,3	132,0	112,0	-15,2
	125,0	138,0	10,4	134,0	132,0	-1,5
	135,0	126,0	-6,7	125,0	134,0	7,2
	151,0	136,0	-9,9	144,0	154,0	6,9
	125,0	130,0	4,0	141,0	132,0	-6,4
	162,0	134,0	-17,3	156,0	150,0	-3,8
	123,0	122,0	-0,8	124,0	150,0	21,0
	133,0	138,0	3,8	155,0	146,0	-5,8
	137,0	142,0	3,6	153,0	144,0	-5,9
Média	133,7	132,7	0,2	140,4	139,3	-0,4
σ	15,2	6,6	10,0	12,5	13,2	10,6
C.V	11,4	4,9		8,9	9,5	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	μm	μm	%	μm	μm	%
BTest 6	123,0	110,0	-10,6	143,0	123,0	-14,0
	124,0	120,0	-3,2	107,0	124,0	15,9
	110,0	112,0	1,8	117,0	110,0	-6,0
	112,0	116,0	3,6	124,0	112,0	-9,7
	112,0	108,0	-3,6	111,0	112,0	0,9
	132,0	130,0	-1,5	132,0	132,0	0,0
	140,0	132,0	-5,7	107,0	120,0	12,1
	128,0	132,0	3,1	140,0	128,0	-8,6
	133,0	136,0	2,3	126,0	133,0	5,6
Média	123,8	121,8	-1,5	123,0	121,6	-0,4
σ	10,6	10,8	4,7	13,6	8,7	10,2
C.V	8,6	8,9	308,3	11,0	7,2	2459,8

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 7	132,0	140,0	6,1	152,0	152,0	0,0
	146,0	142,0	-2,7	154,0	149,0	-3,2
	136,0	148,0	8,8	130,0	124,0	-4,6
	150,0	140,0	-6,7	150,0	130,0	-13,3
	154,0	144,0	-6,5	116,0	132,0	13,8
	152,0	150,0	-1,3	138,0	130,0	-5,8
	131,0	122,0	-6,9	115,0	121,0	5,2
	128,0	126,0	-1,6	109,0	108,0	-0,9
	131,0	134,0	2,3	137,0	131,0	-4,4
Média	140,0	138,4	-0,9	133,4	130,8	-1,5
σ	10,4	9,5	5,7	17,1	13,4	7,6
C.V	7,4	6,8		12,8	10,3	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 8	169,0	156,0	-7,7	142,0	159,0	12,0
	130,0	120,0	-7,7	150,0	130,0	-13,3
	151,0	132,0	-12,6	142,0	151,0	6,3
	128,0	136,0	6,3	142,0	128,0	-9,9
	138,0	144,0	4,3	142,0	138,0	-2,8
	151,0	122,0	-19,2	128,0	141,0	10,2
	127,0	154,0	21,3	162,0	127,0	-21,6
	111,0	140,0	26,1	120,0	111,0	-7,5
	125,0	140,0	12,0	139,0	125,0	-10,1
Média	136,7	138,2	2,5	140,8	134,4	-4,1
σ	17,6	12,5	15,5	11,9	14,5	11,4
C.V	12,8	9,0		8,5	10,8	

Medida	Horizontal (Antes)	Horizontal (Depois)	Variação	Vertical (Antes)	Vertical (Depois)	Variação
Grandeza	µm	µm	%	µm	µm	%
BTest 9	116,0	130,0	12,1	134,0	116,0	-13,4
	143,0	117,0	-18,2	152,0	143,0	-5,9
	125,0	122,0	-2,4	113,0	130,0	15,0
	143,0	115,0	-19,6	126,0	136,0	7,9
	138,0	132,0	-4,3	147,0	161,0	9,5
	138,0	135,0	-2,2	136,0	114,0	-16,2
	146,0	132,0	-9,6	151,0	129,0	-14,6
	131,0	146,0	11,5	144,0	138,0	-4,2
	131,0	138,0	5,3	136,0	131,0	-3,7
Média	134,6	129,7	-3,0	137,7	133,1	-2,8
σ	9,7	10,1	11,5	12,6	14,1	11,3
C.V	7,2	7,8		9,2	10,6	

Anexo C.

Anexo C1 Impregnação dos espécimens de bambu *B. vulgaris* com copolímeros, utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Em seguida, se apresentam os dados obtidos durante o processo de infiltração nos diferentes corpos de provas utilizados nos ensaios mecânicos, como indicam os rótulos das amostras. Nas Tabelas se encontram as medidas percentuais da variação da espessura (h), largura (b), comprimento (L), volume (V), coeficiente de anisotropia (c.a.), massa (m) e densidade (d).

Tabela C1. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* rotulados como natural utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BN1Cp1	-2,47	-2,31	-2,92	-7,51	1,06	-11,17	-3,96
BN1Cp2	-3,44	-2,64	-2,03	-7,90	1,30	-8,83	-1,01
BN1Cp3	-2,88	-1,48	-1,91	-6,14	1,96	-7,46	-1,40
BN1Cp4	-2,73	-1,13	-1,95	-5,70	2,44	-10,51	-5,10
BN1Cp5	-3,81	-3,29	-2,12	-8,94	1,16	-10,06	-1,23
BN1Cp6	-2,61	-2,62	-1,96	-7,02	1,00	-9,21	-2,35
BN1Cp7	-2,70	-2,00	-1,87	-6,44	1,35	-13,83	-7,90
BN1Cp8	-3,10	-1,98	-1,94	-6,86	1,56	-12,65	-6,22
BN1Cp9	-3,71	-2,97	-2,03	-8,46	1,25	-13,01	-4,97
BN1Cp10	-2,34	-1,73	-1,79	-5,75	1,35	-13,75	-8,50
Média	-2,98	-2,22	-2,05	-7,07	1,44	-11,05	-4,26
σ	0,52	0,68	0,32	1,12	0,44	2,21	2,75
C.V.	17,28	30,63	15,49	15,81	30,7	20,01	64,44

Tabela C2. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* utilizados como testemunha térmica no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BTCp1	-4,90	-5,53	-1,22	-11,26	0,89	-23,99	-14,35
BTCp2	-6,52	-3,47	-2,26	-11,80	1,88	-20,41	-9,76
BTCp3	-4,44	-3,23	-2,39	-9,74	1,37	-21,98	-13,56
BTCp4	-7,25	-4,44	-2,07	-13,20	1,63	-21,25	-9,27
BTCp5	-4,70	-2,53	-2,22	-9,17	1,86	-19,54	-11,42
BTCp6	-4,97	-4,68	-2,35	-11,54	1,06	-21,71	-11,50
BTCp7	-6,79	-3,79	-2,06	-12,17	1,79	-22,77	-12,07
BTCp8	-5,13	-3,09	-2,66	-10,50	1,66	-16,80	-7,04
BTCp9	-6,48	-3,37	-1,14	-10,67	1,92	-16,40	-6,41
BTCp10	-6,77	-3,49	-3,41	-13,09	1,94	-19,67	-7,57
Média	-5,80	-3,76	-2,18	-11,31	1,60	-20,45	-10,30
σ	1,05	0,88	0,65	1,33	0,37	2,44	2,74
C.V.	18,2	23,5	30,0	11,7	23,3	11,9	26,6

Tabela C3. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com FAA utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BFAACp1	-7,20	-1,04	-0,82	-8,92	0,14	-16,08	-7,86
BFAACp2	-2,65	-0,28	-1,15	-4,03	0,11	-15,67	-12,13
BFAACp3	-4,02	-1,75	-0,56	-6,23	0,43	-7,74	-1,61
BFAACp4	-10,12	-1,87	-0,84	-12,54	0,18	-20,91	-9,57
BFAACp5	-11,17	-1,92	-0,71	-13,49	0,17	-19,62	-7,09
BFAACp6	-10,77	-1,70	-0,75	-12,94	0,16	-20,18	-8,32
BFAACp7	-14,73	-0,13	-0,62	-15,38	0,01	-9,95	6,41
BFAACp8	-7,28	-1,59	-0,93	-9,59	0,22	-15,76	-6,82
BFAACp9	-10,82	-1,93	-0,11	-12,64	0,18	-24,53	-13,61
BFAACp10	-3,24	-0,38	-0,47	-4,07	0,12	-5,81	-1,82
Média	-8,20	-1,26	-0,70	-9,98	0,17	-15,63	-6,24
σ	3,99	0,73	0,28	4,08	0,11	6,10	5,86
C.V.	48,67	58,32	40,60	40,83	63,11	39,04	93,91

Tabela C4. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com GA 2,5% utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGACp1	3,04	3,48	3,12	9,50	0,75	-7,03	-15,10
BGACp2	3,47	2,34	1,46	6,75	1,20	-7,76	-13,60
BGACp3	1,57	1,61	2,11	4,97	0,72	-5,54	-10,01
BGACp4	4,95	2,08	4,30	10,61	1,86	-7,32	-16,21
BGACp5	4,01	1,99	2,08	7,39	1,58	-9,56	-15,78
BGACp6	5,83	1,77	0,19	6,50	2,51	-11,42	-16,83
BGACp7	5,31	2,13	-3,60	2,58	1,96	-5,96	-8,32
BGACp8	4,38	3,44	2,99	10,52	1,09	-5,71	-14,68
BGACp9	4,32	4,24	-1,30	6,80	0,90	-8,27	-14,11
BGACp10	3,11	0,68	0,14	2,54	2,49	-7,59	-9,87
Média	4,10	2,57	1,15	6,82	1,40	-7,62	-13,45
σ	1,29	0,92	2,35	2,89	0,62	1,93	2,98
C.V.	31,37	35,82	203,87	42,48	44,32	25,37	22,18

Tabela C5. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* impregnadas com SM utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BSMCp1	-4,06	-3,41	-0,92	-8,19	1,19	-10,64	-2,56
BSMCp2	-3,54	-4,41	-0,68	-8,42	0,80	-12,07	-4,03
BSMCp3	-2,43	-3,80	0,34	-5,82	0,64	-8,35	-2,76
BSMCp4	-5,47	-3,62	-1,51	-10,27	1,51	-11,38	-1,22
BSMCp5	-4,16	-4,74	-0,80	-9,43	0,88	-10,93	-1,72
BSMCp6	-3,55	-3,57	-1,98	-8,84	0,99	-10,08	-1,37
BSMCp7	-4,63	-3,59	-1,47	-9,41	1,29	-14,67	-5,79
BSMCp8	-4,66	-4,07	-1,74	-10,13	1,14	-13,49	-3,85
BSMCp9	-5,49	-4,67	-2,98	-12,59	1,18	-13,85	-1,39
BSMCp10	-4,42	-3,27	-2,75	-10,09	1,35	-14,59	-5,05
Média	-4,24	-3,92	-1,45	-9,32	1,10	-12,01	-2,97
σ	0,92	0,53	1,00	1,75	0,27	2,10	1,63
C.V.	21,81	13,46	68,62	18,74	24,31	17,53	54,96

Tabela C6. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SM, utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMCp1	2,02	2,32	0,40	4,81	0,87	8,72	3,73
BGA-SMCp2	3,49	2,18	0,36	6,12	1,60	8,35	2,10
BGA-SMCp3	2,13	2,24	0,11	4,53	0,95	6,40	1,79
BGA-SMCp4	1,80	1,24	-0,11	2,95	1,46	8,00	4,91
BGA-SMCp5	3,26	2,56	0,30	6,23	1,27	9,39	2,98
BGA-SMCp6	2,51	2,04	0,50	5,13	1,23	9,00	3,68
BGA-SMCp7	2,24	3,23	0,32	5,89	0,69	7,55	1,57
BGA-SMCp8	3,87	3,13	-0,33	6,77	1,24	8,70	1,81
BGA-SMCp9	1,65	1,45	-0,19	2,94	1,14	7,39	4,32
BGA-SMCp10	1,76	1,15	0,26	3,20	1,53	9,30	5,91
Média	2,55	2,27	0,15	5,04	1,16	8,17	2,99
σ	0,79	0,72	0,28	1,43	0,29	0,95	1,48
C.V.	31,02	31,78	183,91	28,43	25,28	11,63	49,67

Tabela C7. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SMB, utilizados no ensaio de compressão paralela à fibra.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMBCp1	1,19	2,31	0,97	4,51	1,93	9,62	4,88
BGA-SMBCp2	1,76	1,91	0,77	4,49	1,09	11,23	6,44
BGA-SMBCp3	1,86	2,41	1,66	6,03	1,29	9,30	3,02
BGA-SMBCp4	1,80	2,99	2,82	7,91	1,66	12,03	3,80
BGA-SMBCp5	2,51	1,80	0,50	4,87	0,72	9,03	4,02
BGA-SMBCp6	3,18	2,06	0,70	6,15	0,65	7,98	1,79
BGA-SMBCp7	3,83	2,49	-1,24	5,15	0,65	14,03	8,44
BGA-SMBCp8	2,53	2,31	-0,64	4,27	0,91	10,02	5,63
BGA-SMBCp9	3,51	2,28	-1,18	4,53	0,65	15,03	9,95
BGA-SMBCp10	2,36	2,37	-0,76	4,05	1,00	8,03	3,78
Média	2,45	2,29	0,36	5,20	1,06	10,63	5,17
σ	0,84	0,33	1,32	1,19	0,45	2,42	2,51
C.V.	34,37	14,45	366,48	22,81	42,67	22,77	48,49

Anexo C2. Impregnação dos espécimens de bambu *B. vulgaris* com copolímeros, utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Em seguida, se apresentam os dados obtidos durante o processo de infiltração nos diferentes corpos de provas utilizados nos ensaios mecânicos, como indicam os rótulos das amostras. Nas Tabelas se encontram as medidas percentuais da variação da espessura (h), largura (b), comprimento (L), volume (V), coeficiente de anisotropia (c.a.), massa (m) e densidade (d).

Tabela C8. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* rotulados como natural utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BN1Cr1	-2,46	-3,13	-2,67	-8,08	1,27	-10,06	-2,15
BN1Cr2	-4,75	-4,63	-2,94	-11,79	0,97	-14,78	-3,27
BN1Cr3	-5,14	-4,30	-4,19	-12,97	0,84	-13,99	-1,16
BN1Cr4	-5,15	-3,64	-3,47	-11,77	0,71	-14,53	-3,16
BN1Cr5	-3,96	-3,87	-4,54	-11,82	0,98	-14,45	-3,01
BN1Cr6	-4,62	-4,56	-2,86	-11,60	0,99	-13,75	-2,38
BN1Cr7	-4,69	-4,51	-2,67	-11,47	0,96	-15,38	-4,44
BN1Cr8	-2,73	-2,65	-3,51	-8,61	0,97	-12,88	-4,57
BN1Cr9	-3,35	-2,55	-2,74	-8,48	0,76	-11,12	-2,92
BN1Cr10	-3,89	-4,20	-3,48	-11,12	1,08	-14,55	-3,95
Média	-4,08	-3,80	-3,31	-10,77	0,95	-13,55	-3,10
σ	0,97	0,78	0,66	1,71	0,16	1,71	1,05
C.V.	23,75	20,61	19,81	15,92	16,77	12,64	33,90

Tabela C9. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* utilizados como testemunha térmica no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BTCr1	-4,90	-4,69	-1,22	-10,47	1,04	-23,99	-15,10
BTCr2	-4,78	-3,47	-2,26	-10,16	1,38	-20,41	-11,41
BTCr3	-4,44	-4,06	-2,39	-10,51	1,10	-21,98	-12,82
BTCr4	-5,62	-5,25	-2,07	-12,43	1,07	-21,25	-10,08
BTCr5	-4,70	-3,34	-2,22	-9,93	1,40	-19,54	-10,67
BTCr6	-4,97	-4,68	-2,35	-11,54	1,06	-21,71	-11,50
BTCr7	-5,18	-4,58	-2,06	-11,39	1,13	-22,77	-12,85
BTCr8	-4,33	-4,75	-2,66	-11,29	0,91	-16,80	-6,21
BTCr9	-5,70	-4,19	-1,14	-10,68	1,36	-16,40	-6,40
BTCr10	-4,37	-3,49	-3,41	-10,85	1,25	-19,67	-9,89
Média	-4,90	-4,25	-2,18	-10,93	1,17	-20,45	-10,69
σ	0,48	0,65	0,65	0,75	0,17	2,44	2,78
C.V.	9,9	15,3	30,0	6,8	14,3	11,9	26,0

Tabela C10. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com GA 2,5% utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGACr1	4,98	5,03	-0,79	11,13	0,99	-2,91	-12,63
BGACr2	5,89	6,03	0,19	12,49	0,98	-6,82	-17,17
BGACr3	3,39	3,64	-0,37	6,76	0,93	-4,36	-10,42
BGACr4	5,75	3,72	-0,89	10,66	1,55	-5,60	-14,70
BGACr5	6,45	5,00	-0,62	11,08	1,29	-9,97	-18,95
BGACr6	6,53	2,89	-0,88	8,65	2,26	-6,31	-13,77
BGACr7	7,83	6,21	-0,38	14,09	1,26	-7,33	-18,78
BGACr8	5,30	5,71	-2,02	13,56	0,93	-2,45	-14,10
BGACr9	6,92	6,12	-0,12	13,33	1,13	-9,06	-19,75
BGACr10	4,44	4,14	-1,24	7,43	1,07	-7,06	-13,48
Média	5,75	4,85	-0,71	10,92	1,24	-6,19	-15,37
σ	1,29	1,19	0,62	2,58	0,41	2,44	3,11
C.V.	22,37	24,53	87,15	23,66	33,04	39,40	20,23

Tabela C11. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* impregnadas com SM utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	D
BSMCr1	-3,26	-2,63	-2,86	-8,50	1,24	-9,38	2,96
BSMCr2	-5,57	-4,99	-3,13	-13,08	1,12	-16,46	-5,31
BSMCr3	-5,25	-5,36	-2,26	-12,36	0,98	-16,63	3,43
BSMCr4	-3,83	-3,07	-2,16	-8,79	1,25	-10,10	2,44
BSMCr5	-4,83	-4,14	-2,34	-10,91	1,17	-12,53	2,27
BSMCr6	-3,15	-4,87	-3,04	-10,66	0,65	-11,72	12,40
BSMCr7	-3,12	-4,91	-2,87	-10,52	0,63	-10,57	-2,59
BSMCr8	-3,60	-2,88	-3,70	-9,84	1,25	-13,05	-3,40
BSMCr9	-4,30	-3,56	-2,94	-10,42	1,21	-11,29	-0,64
BSMCr10	-4,37	-4,08	-3,66	-11,62	1,07	-14,71	-0,68
Média	-4,13	-4,05	-2,89	-10,67	1,06	-12,64	1,09
σ	0,88	0,98	0,53	1,44	0,24	2,56	4,96
C.V.	21,39	24,21	18,43	13,49	22,35	20,25	455,74

Tabela C12. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SM, utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMCr1	1,80	1,50	0,50	4,05	1,92	12,13	7,77
BGA-SMCr2	1,24	1,95	0,08	4,64	1,50	11,23	6,30
BGA-SMCr3	2,07	1,38	0,81	5,28	3,41	9,30	3,82
BGA-SMCr4	2,98	2,60	-0,23	5,50	2,15	12,00	6,17
BGA-SMCr5	3,74	2,87	0,98	6,14	1,02	9,00	2,69
BGA-SMCr6	3,44	3,72	0,70	6,94	0,91	8,00	0,99
BGA-SMCr7	3,39	3,06	-0,22	6,22	1,12	14,00	7,32
BGA-SMCr8	3,67	2,91	0,33	6,16	1,29	10,00	3,62
BGA-SMCr9	2,44	2,37	1,60	6,19	1,48	15,00	8,30
BGA-SMCr10	3,08	3,06	1,33	6,23	0,99	8,00	1,67
Média	2,75	2,48	0,51	5,68	1,64	11,18	5,22
σ	0,86	0,75	0,62	0,87	0,76	2,43	2,64
C.V.	31,08	30,01	121,67	15,30	46,27	21,71	50,52

Tabela C13. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SMB, utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMBCr1	1,96	0,90	0,70	3,59	2,17	11,65	7,77
BGA-SMBCr2	2,27	1,50	-0,40	3,39	1,51	10,96	7,33
BGA-SMBCr3	2,07	0,70	-0,38	2,39	2,96	10,21	7,63
BGA-SMBCr4	2,69	1,50	0,50	4,76	1,80	11,95	6,87
BGA-SMBCr5	1,43	2,20	0,70	4,39	0,65	11,07	6,40
BGA-SMBCr6	2,49	2,90	0,90	6,42	0,86	9,37	2,77
BGA-SMBCr7	2,15	2,70	6,20	11,41	0,80	12,74	1,19
BGA-SMBCr8	1,98	2,20	-1,80	2,35	0,90	10,53	7,99
BGA-SMBCr9	2,25	1,50	-2,80	0,87	1,50	12,89	11,92
BGA-SMBCr10	1,94	2,10	-0,80	3,25	0,92	9,05	5,62
Média	2,12	1,82	0,28	4,28	1,41	11,04	6,55
σ	0,34	0,72	2,40	2,92	0,74	1,30	2,95
C.V.	16,20	39,77	849,99	68,27	52,41	11,77	44,99

Anexo C3. Impregnação dos espécimens de bambu *B. vulgaris* com copolímeros, utilizados no ensaio a flexão.

Em seguida, se apresentam os dados obtidos durante o processo de infiltração nos diferentes corpos de provas utilizados nos ensaios mecânicos, como indicam os rótulos das amostras. Nas Tabelas se encontram as medidas percentuais da variação da espessura (h), largura (b), comprimento (L), volume (V), coeficiente de anisotropia (c.a.), massa (m) e densidade (d).

Tabela C14. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* rotulados como natural utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BNF1	-5,09	-4,17	-2,82	-11,61	1,22	-15,27	-4,09
BNF2	-7,61	-6,08	-2,09	-15,10	1,25	-16,95	-2,24
BNF3	-6,83	-5,74	-2,04	-13,97	1,19	-14,63	-0,76
BNF4	-1,15	-3,06	-2,63	-6,63	0,38	-9,96	-3,61
BNF5	-5,14	-4,75	-2,79	-12,10	1,08	-13,91	-2,10
BNF6	-5,40	-3,91	-2,64	-11,50	1,38	-14,84	-3,74
BNF7	-1,61	-1,64	-2,69	-5,88	0,98	-12,98	-7,50
BNF8	-3,98	-3,73	-2,13	-9,48	1,07	-11,27	-1,98
BNF9	-6,52	-5,43	-2,66	-13,95	1,20	-14,58	-0,67
BNF10	-1,52	-2,04	-1,45	-4,96	0,75	-9,07	-4,26
Média	-4,49	-4,06	-2,40	-10,52	1,05	-13,35	-3,09
σ	2,35	1,50	0,45	3,62	0,29	2,51	2,02
C.V.	52,29	37,08	18,59	34,41	27,97	18,78	65,27

Tabela C15. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* utilizados como testemunha térmica no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BTF1	-11,14	-8,80	-2,15	-20,70	1,27	-27,11	-8,08
BTF2	-5,92	-2,71	0,51	-8,00	2,18	-24,14	-17,54
BTF3	-8,24	-7,40	-1,64	-16,43	1,11	-25,75	-11,15
BTF4	-9,56	-6,07	-2,12	-16,85	1,58	-23,90	-8,48
BTF5	-8,89	-8,21	-2,94	-18,82	1,08	-22,26	-4,24
BTF6	-8,08	-6,70	-3,48	-17,22	1,21	-22,48	-6,35
BTF7	-6,71	-6,22	-3,57	-15,64	1,08	-28,24	-14,94
BTF8	-9,55	-7,00	-2,50	-17,98	1,36	-17,51	0,58
BTF9	-5,18	-3,08	-3,88	-11,66	1,68	-21,74	-11,41
BTF10	-8,31	-4,32	-2,33	-14,32	1,93	-22,16	-9,15
Média	-8,16	-6,05	-2,41	-15,76	1,45	-23,53	-9,08
σ	1,81	2,07	1,26	3,68	0,38	3,06	5,18
C.V.	22,1	34,1	52,1	23,3	26,5	13,0	57,0

Tabela C16. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com FAA utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BFAAF1	-4,01	-6,79	-2,11	-12,41	0,59	-21,05	-9,86
BFAAF2	-4,47	-7,69	-1,59	-13,22	0,58	-13,64	-0,48
BFAAF3	-3,61	-5,47	-3,35	-11,94	0,66	-20,20	-9,38
BFAAF4	-8,44	-8,53	-2,13	-18,03	0,99	-26,82	-10,72
BFAAF5	-4,14	-9,80	-2,32	-15,54	0,42	-21,51	-7,08
BFAAF6	-6,12	-9,25	-1,32	-15,93	0,66	-20,97	-6,00
BFAAF7	-4,32	-8,75	-2,53	-14,90	0,49	-19,95	-5,93
BFAAF8	-5,97	-5,89	-3,09	-14,24	1,01	-14,29	-0,06
BFAAF9	-4,62	-6,61	-2,14	-12,83	0,70	-22,73	-11,36
BFAAF10	-3,98	-7,10	-2,31	-12,86	0,56	-15,44	-2,96
Média	-4,97	-7,59	-2,29	-14,19	0,67	-19,66	-6,38
σ	1,48	1,46	0,61	1,91	0,19	4,10	4,11
C.V.	29,70	19,20	26,63	13,48	29,12	20,83	64,40

Tabela C17. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com GA 2,5% utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGAF1	2,62	2,67	2,53	8,03	0,98	-8,25	-15,07
BGAF2	2,81	2,94	1,44	7,35	0,95	-10,08	-16,24
BGAF3	1,16	1,41	1,07	3,69	0,82	-7,88	-11,15
BGAF4	3,88	1,88	3,65	9,70	2,06	-8,05	-16,19
BGAF5	3,15	1,74	1,75	6,78	1,80	-10,92	-16,58
BGAF6	4,45	0,87	0,04	5,39	5,10	-11,42	-15,95
BGAF7	4,18	2,62	1,19	8,19	1,60	-8,19	-15,14
BGAF8	3,75	4,15	1,70	9,89	0,90	-10,21	-18,29
BGAF9	3,80	3,03	0,10	7,05	1,25	-15,86	-21,40
BGAF10	1,70	1,41	-0,90	2,20	1,21	-10,46	-12,38
Média	3,31	2,37	1,26	6,83	1,72	-10,10	-15,84
σ	1,01	0,99	1,31	2,46	1,34	2,55	2,84
C.V.	30,55	41,88	104,03	36,09	77,97	25,21	17,96

Tabela C18. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* impregnadas com SM utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BSMF1	-5,23	-4,35	-3,00	-12,08	1,20	-15,43	5,80
BSMF2	-7,82	-6,26	-2,28	-15,56	1,25	-17,11	-2,35
BSMF3	-7,07	-5,94	-2,23	-14,53	1,19	-14,79	3,24
BSMF4	-1,35	-3,26	-2,82	-7,26	0,41	-10,13	-1,67
BSMF5	-5,36	-4,91	-2,98	-12,68	1,09	-14,08	4,88
BSMF6	-5,53	-4,10	-2,83	-11,96	1,35	-15,00	7,42
BSMF7	-1,80	-1,82	-2,88	-6,37	0,99	-13,15	-11,70
BSMF8	-4,16	-3,92	-2,32	-10,05	1,06	-11,44	-1,77
BSMF9	-6,75	-5,63	-2,85	-14,51	1,20	-14,74	6,62
BSMF10	-1,72	-2,22	-1,64	-5,48	0,77	-9,25	-4,00
Média	-4,68	-4,24	-2,58	-11,05	1,05	-13,51	0,65
σ	2,35	1,50	0,44	3,61	0,28	2,50	6,03
C.V.	50,27	35,47	17,21	32,70	26,18	18,51	932,18

Tabela C19. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SM, utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMF1	1,50	1,20	0,37	3,10	1,25	8,43	5,17
BGA-SMF2	1,10	1,80	0,18	3,11	0,61	9,80	6,49
BGA-SMF3	1,60	1,00	0,51	3,14	1,60	5,04	1,84
BGA-SMF4	2,20	1,80	0,97	5,04	1,22	6,55	1,43
BGA-SMF5	3,35	2,50	0,50	6,46	1,34	11,00	4,26
BGA-SMF6	2,88	3,20	0,70	6,92	0,90	10,06	2,94
BGA-SMF7	3,32	3,00	0,08	6,51	1,11	11,70	4,87
BGA-SMF8	3,20	2,50	0,55	6,36	1,28	10,86	4,23
BGA-SMF9	1,81	1,80	0,78	4,45	1,01	11,00	6,27
BGA-SMF10	2,35	2,40	0,89	5,74	0,98	10,70	4,69
Média	2,33	2,09	0,52	5,01	1,15	9,38	4,17
σ	0,82	0,72	0,29	1,54	0,27	2,18	1,70
C.V.	35,36	34,65	56,14	30,76	23,81	23,25	40,76

Tabela C20. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SMB, utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMBF1	1,84	0,70	1,20	3,78	2,63	11,20	7,15
BGA-SMBF2	1,44	1,30	1,80	4,61	1,11	11,80	6,87
BGA-SMBF3	1,94	0,50	1,00	3,47	3,88	11,00	7,27
BGA-SMBF4	2,54	1,30	1,80	5,74	1,95	11,80	5,73
BGA-SMBF5	1,34	2,00	2,50	5,95	0,67	12,50	6,18
BGA-SMBF6	1,64	2,70	3,20	7,72	0,61	13,20	5,08
BGA-SMBF7	2,04	2,50	3,00	7,73	0,82	13,00	4,89
BGA-SMBF8	1,84	2,00	2,50	6,47	0,92	12,50	5,66
BGA-SMBF9	1,34	1,30	1,80	4,51	1,03	11,80	6,98
BGA-SMBF10	1,04	1,90	2,40	5,43	0,55	12,40	6,61
Média	1,70	1,62	2,12	5,54	1,42	12,12	6,24
σ	0,43	0,72	0,72	1,49	1,09	0,72	0,86
C.V.	25,44	44,68	34,15	26,86	76,80	5,97	13,85

Anexo D. Compressão paralela às fibras

A seguir se apresentam os gráficos e os valores obtidos de resistência máximo e módulo de elasticidade dos ensaios à compressão paralela à fibra. Assim como também os gráficos de resistência contra densidade e resistência contra o conteúdo de umidade.

Figura D1. Gráficos Resistência-Deformação das amostras Natural durante os ensaios à compressão paralela às fibras.

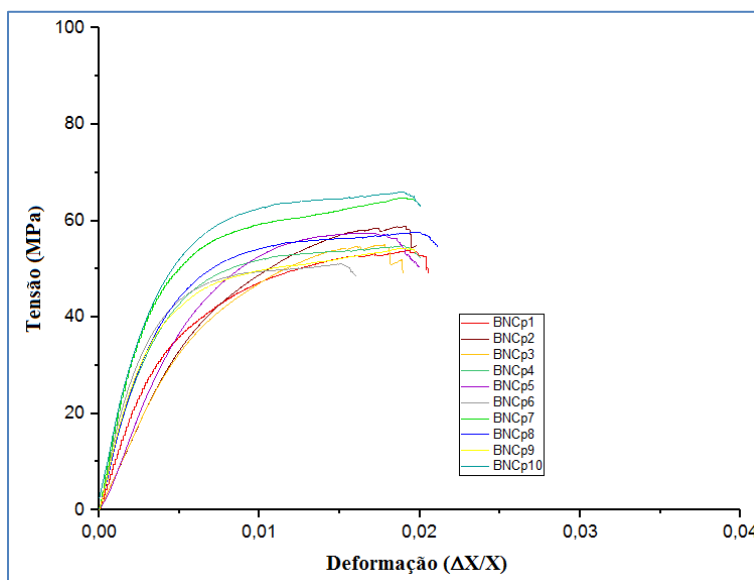


Tabela D1. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova rotulados como Natural

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m³)	(%)
BNCp1	53,78	40,34	5,39	615	15,72
BNCp2	58,90	44,18	5,20	664	10,92
BNCp3	54,90	41,18	5,02	649	13,04
BNCp4	54,77	41,08	6,51	637	13,43
BNCp5	57,35	43,01	6,46	678	11,46
BNCp6	51,01	38,26	8,70	610	14,60
BNCp7	64,61	48,46	9,29	692	9,97
BNCp8	57,57	43,18	7,97	649	13,32
BNCp9	54,37	40,78	7,59	654	13,29
BNCp10	65,99	49,49	9,46	683	9,39
Média	56,47	42,36	6,65	649	12,73
σ	4,38	3,29	1,71	31	2,06
C.V.	7,76	7,76	25,73	5	16,20

Figura D2. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras rotuladas como Natural

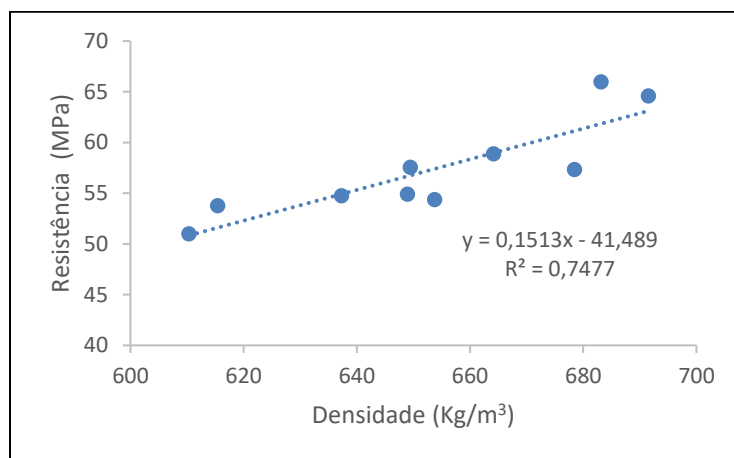


Figura D3. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras rotuladas como Natural

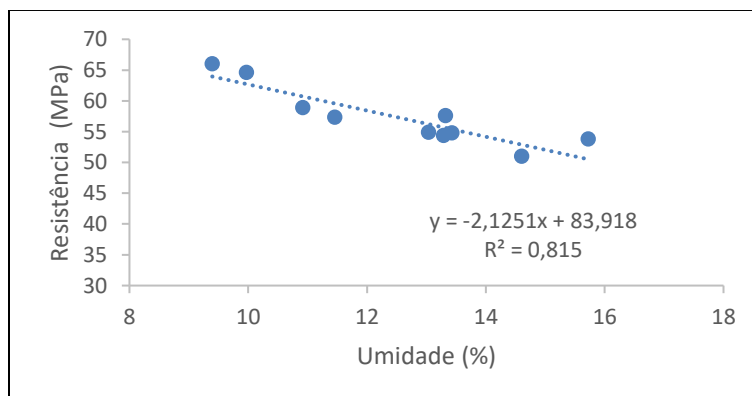


Figura D4. Gráficos Resistência-Deformação das amostras Testemunha térmica durante os ensaios à compressão paralela.

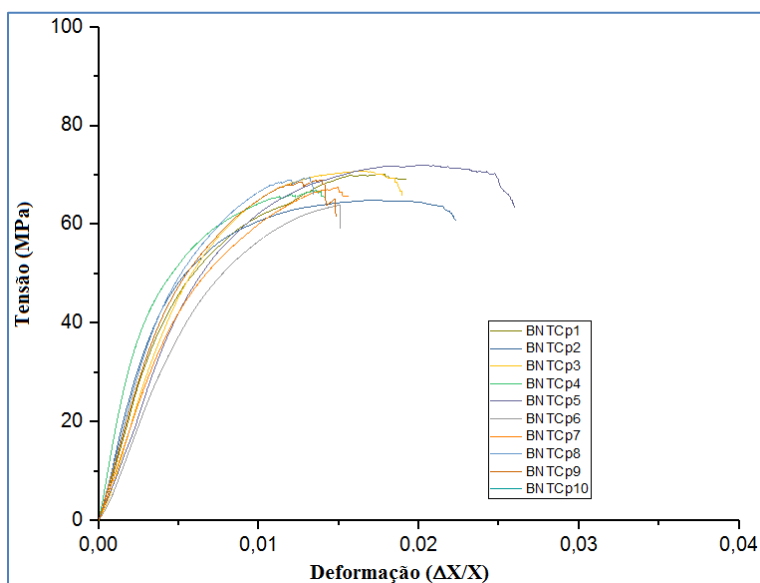


Tabela D2. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova rotulados como Testemunha Térmica.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BTCp1	66,02	49,52	7,21	650	8,28
BTCp2	64,8	48,60	8,94	650	9,25
BTCp3	63,95	47,96	7,02	643	10,42
BTCp4	66,6	49,95	10,27	659	7,30
BTCp5	65,05	48,79	6,97	651	8,55
BTCp6	63,82	47,87	6,72	646	10,32
BTCp7	67,39	50,54	7,50	683	7,62
BTCp8	63,24	47,43	8,32	631	14,81
BTCp9	64,84	48,63	8,16	649	8,93
BTCp10	63,95	47,96	6,99	637	8,59
Média	64,97	48,72	7,81	649,88	9,41
σ	1,34	1,00	1,12	13,83	2,15
C.V.	2,06	2,06	14,39	2,13	22,85

Figura D5. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras rotuladas como Testemunha térmica.

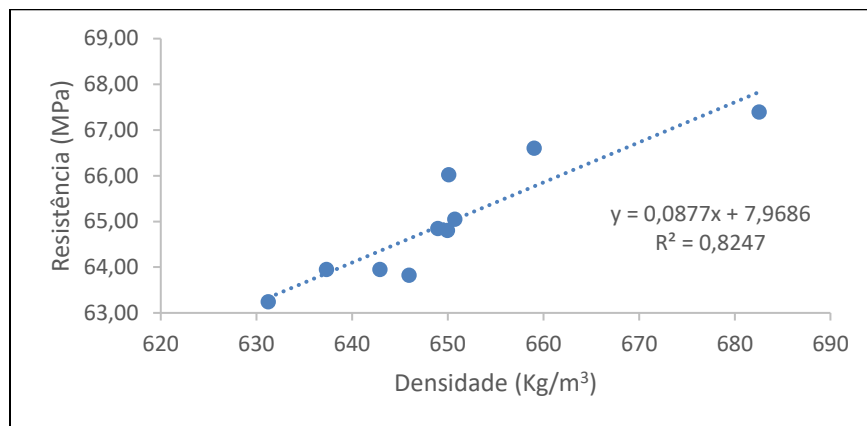


Figura D6. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras rotuladas como Testemunha térmica.

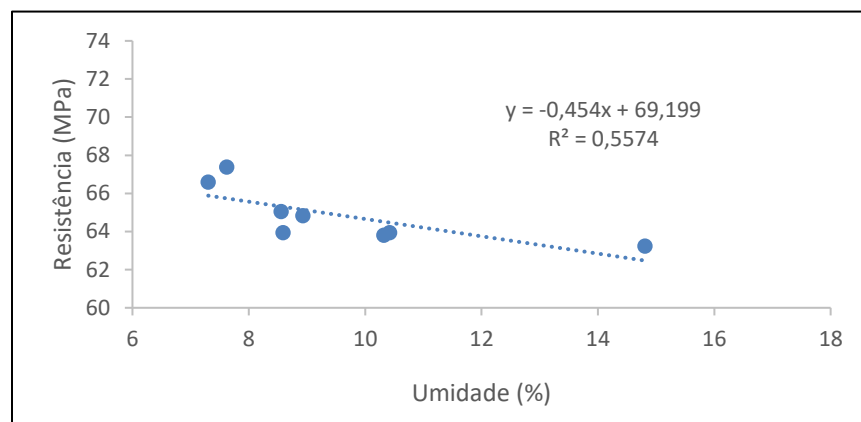


Figura D7. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução FAA durante os ensaios à compressão paralela.

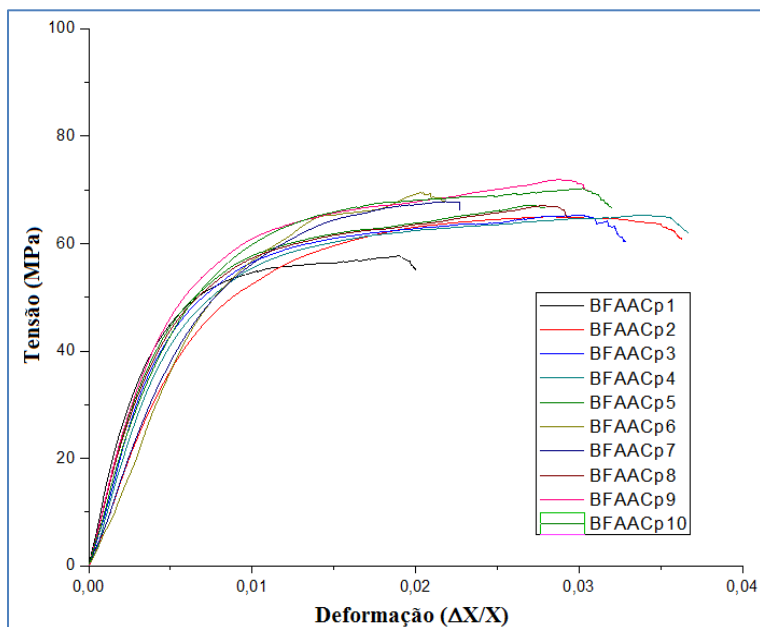


Tabela D3. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução FAA.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BFAACp1	57,61	43,21	7,74	571	12,40
BFAACp2	64,73	48,55	7,84	605	13,62
BFAACp3	65,03	48,77	6,70	623	14,77
BFAACp4	65,16	48,87	6,49	605	9,13
BFAACp5	67,06	50,30	5,31	620	10,14
BFAACp6	67,23	50,42	6,59	647	12,68
BFAACp7	69,31	51,98	6,39	681	10,75
BFAACp8	67,61	50,71	5,97	618	10,33
BFAACp9	72,00	54,00	6,54	679	9,33
BFAACp10	70,23	52,67	6,68	684	9,32
Média	66,60	49,95	6,63	633,40	11,25
σ	3,95	2,96	0,74	38,16	1,99
C.V.	5,93	5,93	11,21	6,02	17,69

Figura D8. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução FAA.

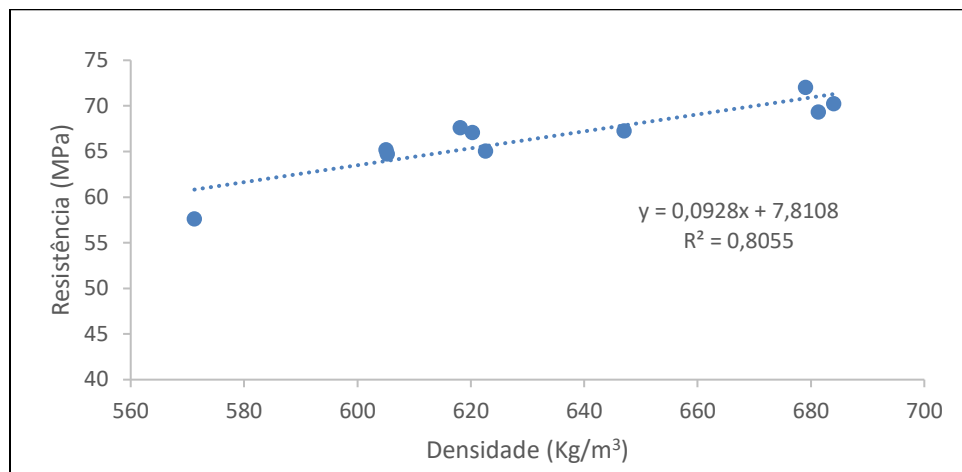


Figura D9. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução FAA.

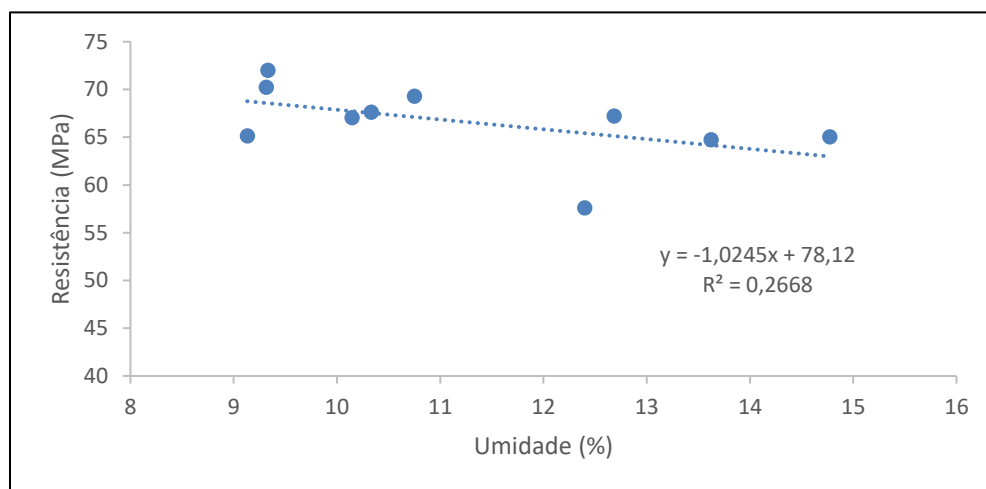


Figura D10. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA durante os ensaios à compressão paralela às fibras.

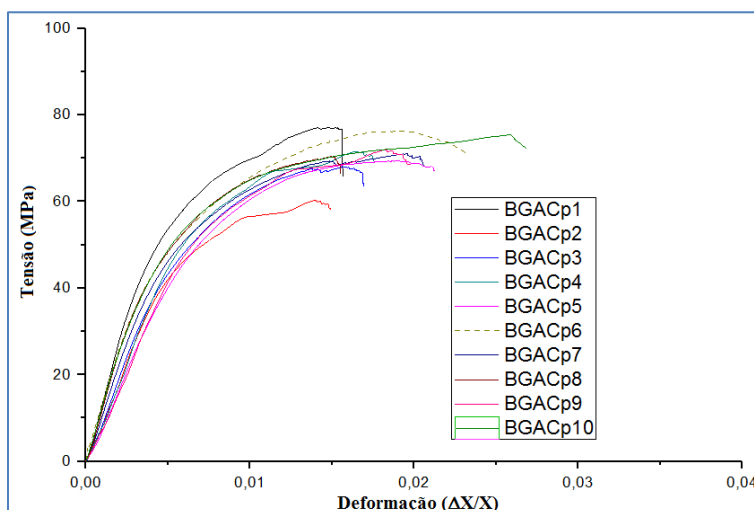


Tabela D4. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGACp1	77,08	57,81	8,83	696	11,87
BGACp2	60,08	45,06	7,48	645	13,60
BGACp3	67,91	50,93	7,48	655	14,69
BGACp4	71,60	53,70	7,78	680	11,66
BGACp5	69,13	51,85	6,95	681	16,20
BGACp6	76,10	57,08	7,03	678	9,69
BGACp7	70,98	53,24	7,33	686	13,19
BGACp8	70,36	52,77	8,35	668	15,89
BGACp9	71,90	53,93	9,15	686	13,17
BGACp10	75,49	56,62	7,46	690	9,85
Média	71,06	53,30	7,78	676,50	12,98
σ	4,91	3,68	0,75	16,05	2,26
C.V.	6,91	6,91	9,62	2,37	17,38

Figura D11. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA.

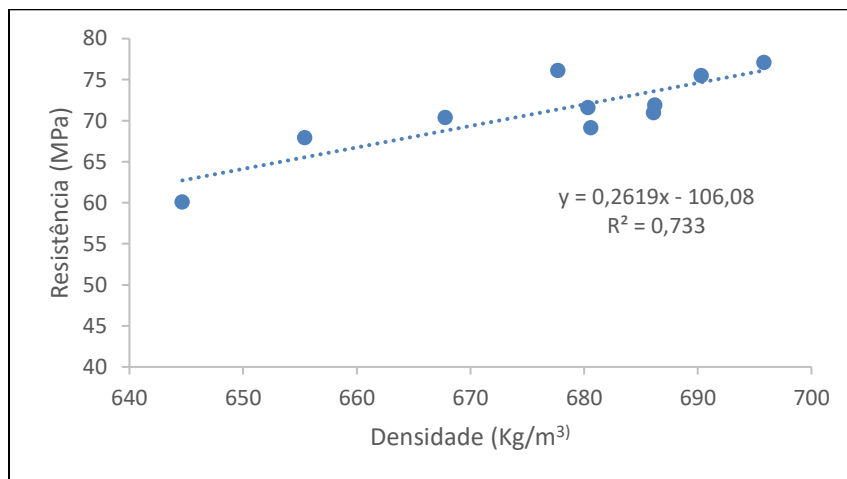


Figura D12. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA.

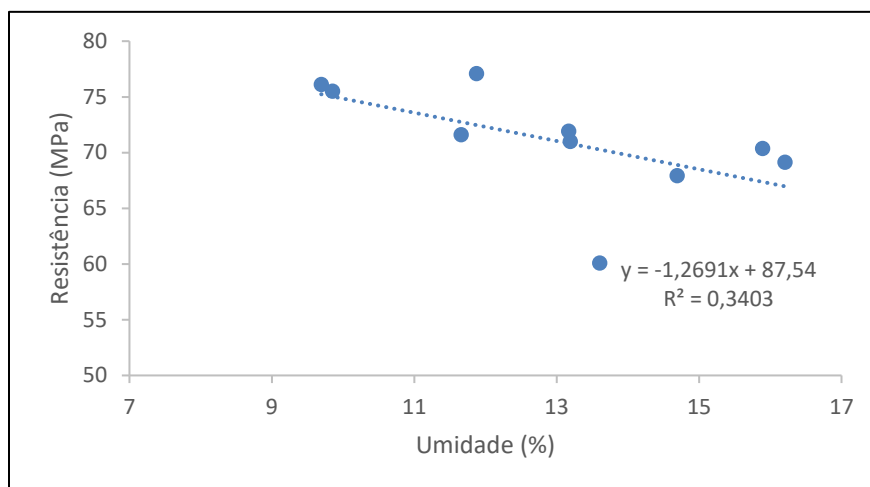


Figura D13. Gráficos Resistência-Deformação das amostras impregnadas com SM durante os ensaios à compressão paralela às fibras.

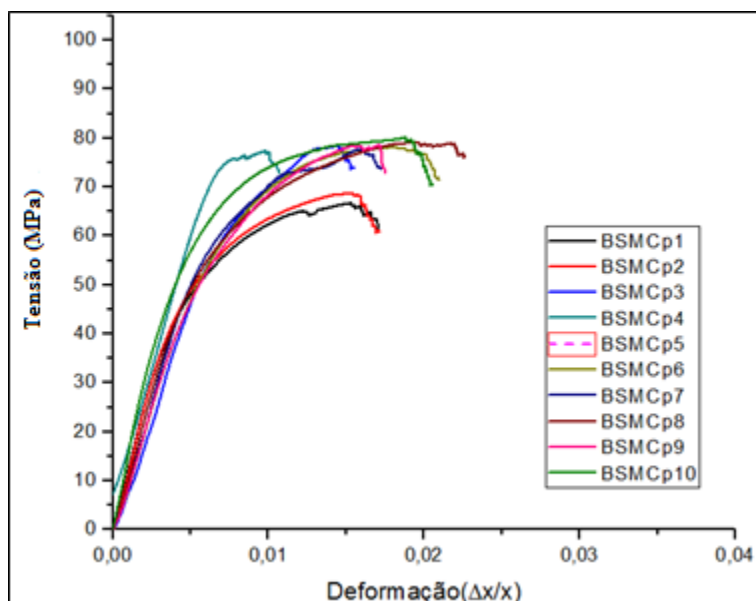


Tabela D5. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova impregnados com SM.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m³)	(%)
BSMCp1	66,42	49,81	8,88	599	14,21
BSMCp2	68,71	51,53	8,57	616	12,75
BSMCp3	77,29	57,96	9,04	710	9,66
BSMCp4	77,17	57,87	11,10	701	9,45
BSMCp5	72,97	54,73	6,83	660	12,30
BSMCp6	78,25	58,69	8,13	697	7,89
BSMCp7	77,66	58,25	8,55	649	9,81
BSMCp8	78,09	58,57	8,27	698	7,29
BSMCp9	78,63	58,97	7,61	693	9,52
BSMCp10	79,66	59,75	9,89	666	11,55
Média	75,48	56,61	8,69	668,88	10,44
σ	4,56	3,42	1,18	38,09	2,20
C.V.	6,04	6,04	13,62	5,69	21,04

Figura D14. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras impregnadas com SM

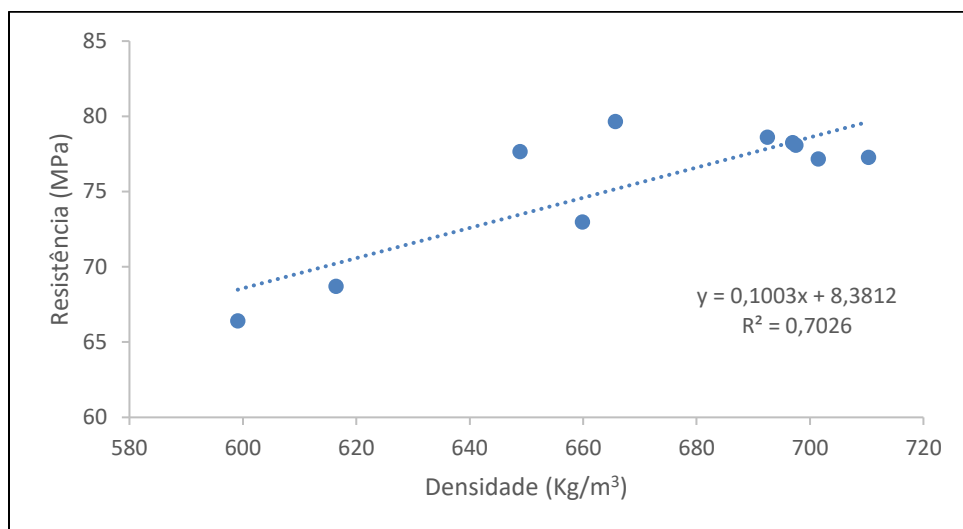


Figura D15. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras impregnadas com SM.

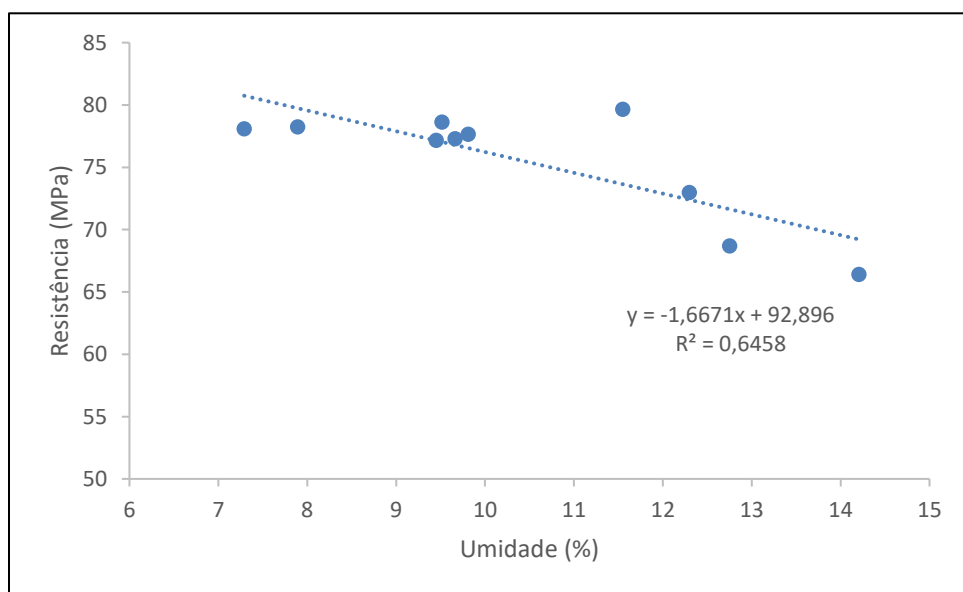


Figura D16. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM durante os ensaios à compressão paralela às fibras.

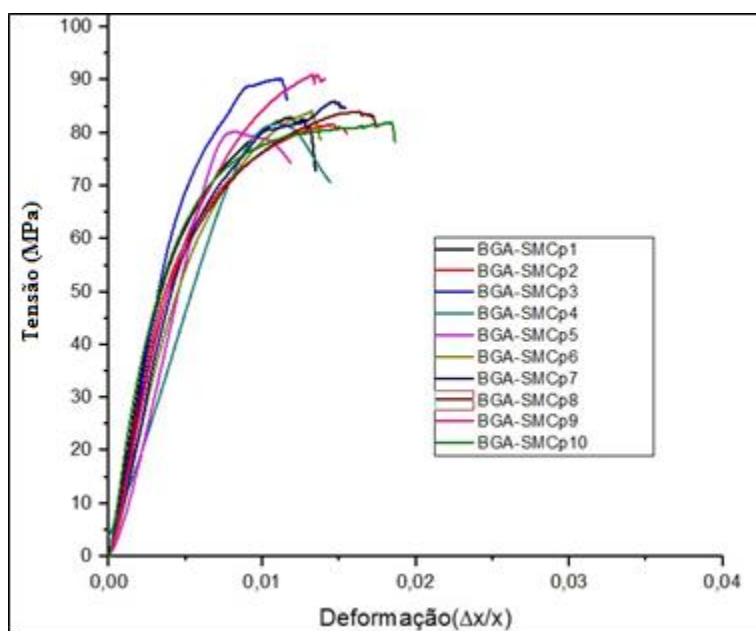


Tabela D6. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA e impregnadas com SM.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGA-SMCp1	82,82	62,12	11,39	643	11,55
BGA-SMCp2	81,34	61,00	10,17	627	11,38
BGA-SMCp3	90,22	67,66	14,18	694	10,76
BGA-SMCp4	81,59	61,19	8,80	605	12,23
BGA-SMCp5	88,56	66,42	13,16	677	10,13
BGA-SMCp6	84,34	63,26	10,79	653	9,70
BGA-SMCp7	85,70	64,27	10,71	624	10,21
BGA-SMCp8	84,05	63,04	9,84	660	10,01
BGA-SMCp9	90,98	68,23	9,81	689	10,13
BGA-SMCp10	82,00	61,50	12,28	633	12,09
Média	85,16	63,87	11,11	650,6	10,82
σ	3,59	2,69	1,66	29,7	0,92
C.V.	6,91	6,91	9,62	2,37	8,54

Figura D17. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM.

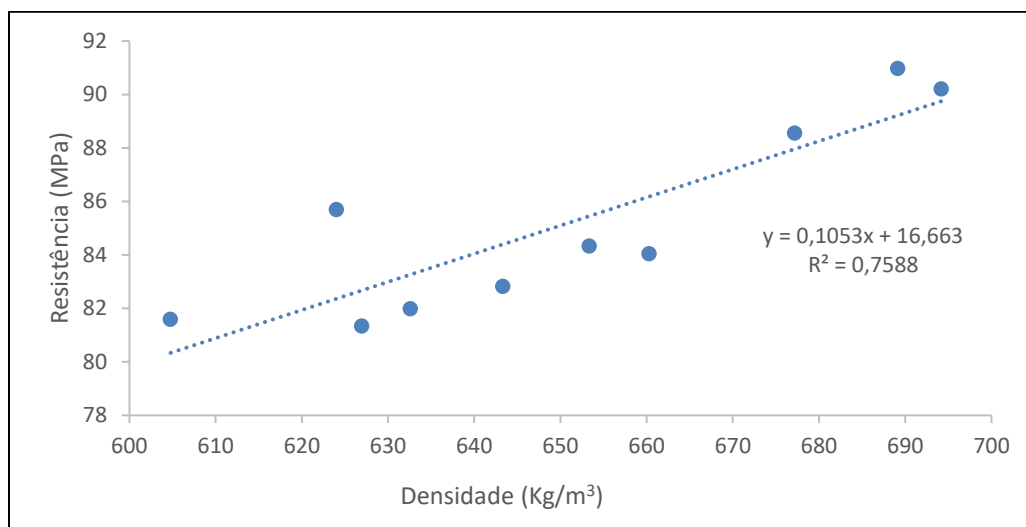


Figura D18. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM.

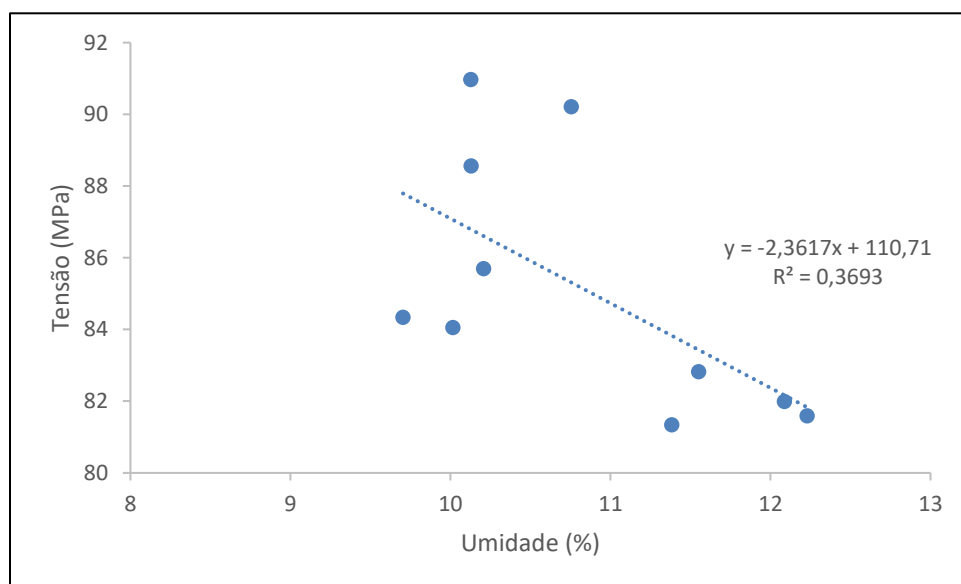


Figura D19. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB durante os ensaios à compressão paralela às fibras.

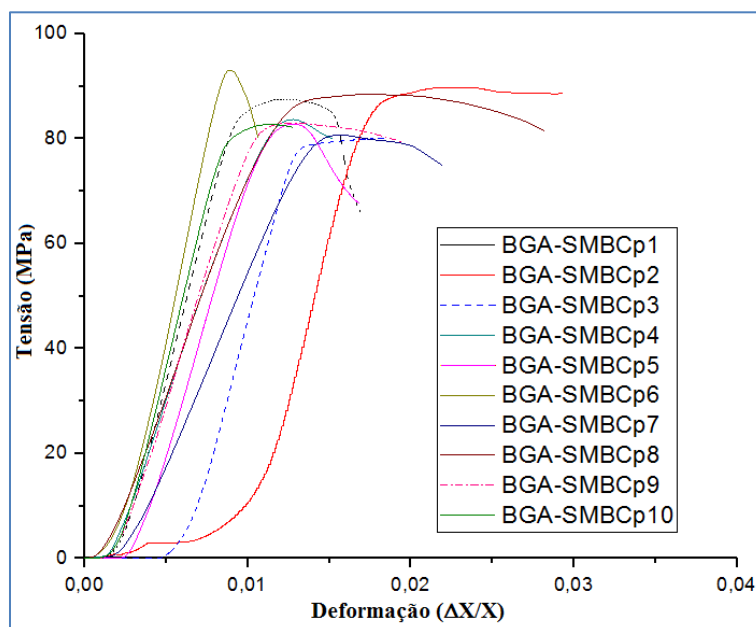


Tabela D7. Parâmetros de resistência à compressão paralela às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA e impregnadas com SMB.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGA-SMBCp1	87,48	65,61	12,66	647	12,78
BGA-SMBCp2	89,55	67,16	11,17	670	11,65
BGA-SMBCp3	78,97	59,23	12,54	594	13,40
BGA-SMBCp4	83,71	62,78	9,13	617	13,05
BGA-SMBCp5	82,92	62,19	10,86	612	12,04
BGA-SMBCp6	93,05	69,78	10,37	680	9,81
BGA-SMBCp7	80,60	60,45	10,30	608	12,45
BGA-SMBCp8	88,53	66,40	8,75	625	12,69
BGA-SMBCp9	82,92	62,19	10,34	606	11,74
BGA-SMBCp10	82,59	61,94	12,36	630	14,93
Média	85,03	63,77	10,85	628,8	12,45
σ	4,42	3,32	1,36	28,5	1,33
C.V.	5,20	5,20	12,54	4,5	10,66

Figura D20. Resistência à compressão paralela às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB.

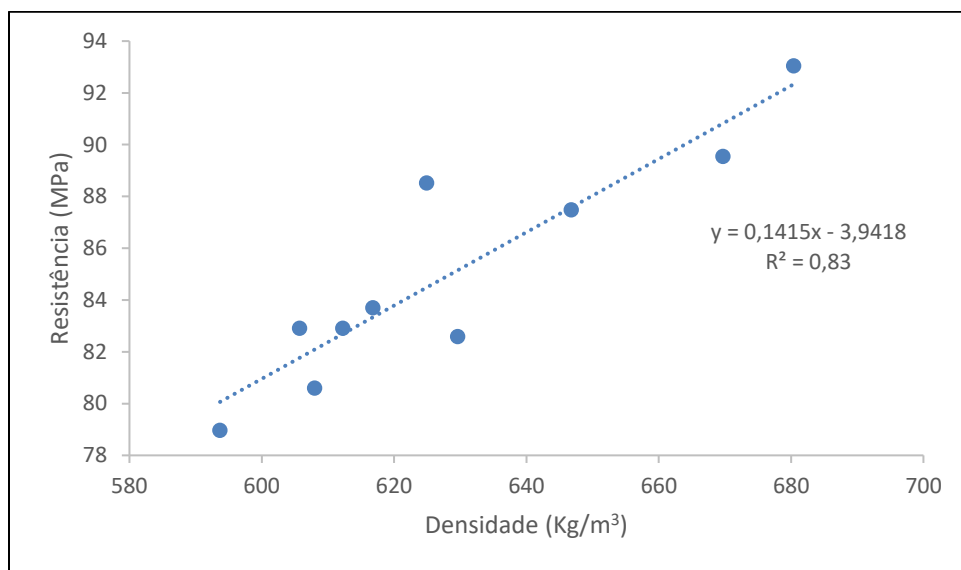
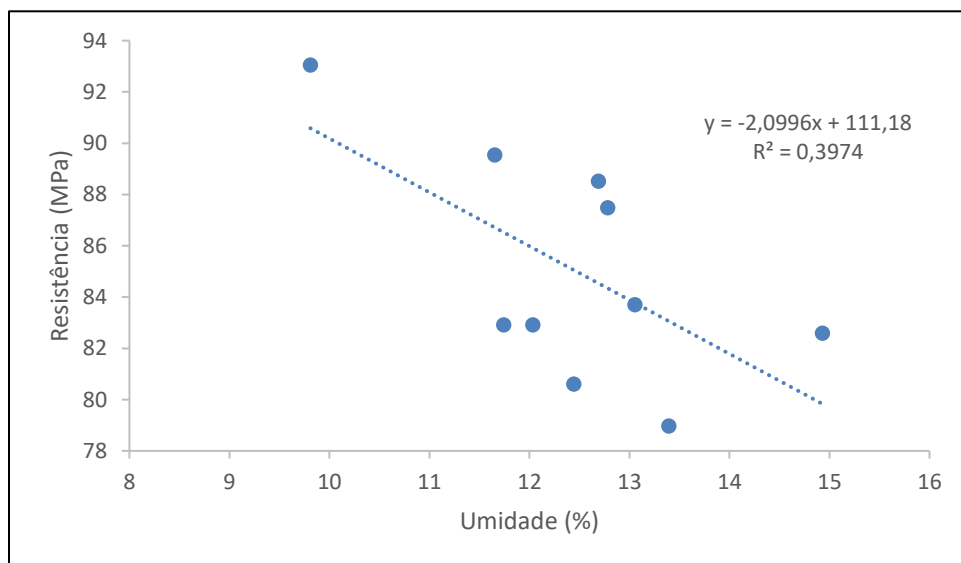


Figura D21. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB.



Anexo E. Impregnação dos espécimens de bambu *B. vulgaris* com copolímeros, utilizados no ensaio à compressão perpendicular às fibras.

Em seguida, se apresentam os dados obtidos durante o processo de infiltração nos diferentes corpos de prova, como indicam os rótulos das amostras. Nas Tabelas se encontram as medidas percentuais da variação da espessura (t), largura (b), comprimento (L), volume (V), coeficiente de anisotropia (c.a.), massa (m) e densidade (d).

Tabela E1. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* nomeados de natural utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BNCr1	-2,46	-3,13	-2,67	-8,08	1,27	-10,06	-2,15
BNCr2	-4,75	-4,63	-2,94	-11,79	0,97	-14,78	-3,27
BNCr3	-5,14	-4,30	-4,19	-12,97	0,84	-13,99	-1,16
BNCr4	-5,15	-3,64	-3,47	-11,77	0,71	-14,53	-3,16
BNCr5	-3,96	-3,87	-4,54	-11,82	0,98	-14,45	-3,01
BNCr6	-4,62	-4,56	-2,86	-11,60	0,99	-13,75	-2,38
BNCr7	-4,69	-4,51	-2,67	-11,47	0,96	-15,38	-4,44
BNCr8	-2,73	-2,65	-3,51	-8,61	0,97	-12,88	-4,57
BNCr9	-3,35	-2,55	-2,74	-8,48	0,76	-11,12	-2,92
BNCr10	-3,89	-4,20	-3,48	-11,12	1,08	-14,55	-3,95
Média	-4,08	-3,80	-3,31	-10,77	0,95	-13,55	-3,10
σ	0,97	0,78	0,66	1,71	0,16	1,71	1,05
C.V.	23,75	20,61	19,81	15,92	16,77	12,64	33,90

Tabela E2. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* nomeados como testemunha térmica no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BTCr1	-4,90	-4,69	-1,22	-10,47	1,04	-23,99	-15,10
BTCr2	-4,78	-3,47	-2,26	-10,16	1,38	-20,41	-11,41
BTCr3	-4,44	-4,06	-2,39	-10,51	1,10	-21,98	-12,82
BTCr4	-5,62	-5,25	-2,07	-12,43	1,07	-21,25	-10,08
BTCr5	-4,70	-3,34	-2,22	-9,93	1,40	-19,54	-10,67
BTCr6	-4,97	-4,68	-2,35	-11,54	1,06	-21,71	-11,50
BTCr7	-5,18	-4,58	-2,06	-11,39	1,13	-22,77	-12,85
BTCr8	-4,33	-4,75	-2,66	-11,29	0,91	-16,80	-6,21
BTCr9	-5,70	-4,19	-1,14	-10,68	1,36	-16,40	-6,40
BTCr10	-4,37	-3,49	-3,41	-10,85	1,25	-19,67	-9,89
Média	-4,90	-4,25	-2,18	-10,93	1,17	-20,45	-10,69
σ	0,48	0,65	0,65	0,75	0,17	2,44	2,78
C.V.	9,9	15,3	30,0	6,8	14,3	11,9	26,0

Tabela E3. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com GA 2,5% utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGACr1	4,98	5,03	-0,79	11,13	0,99	-2,91	-12,63
BGACr2	5,89	6,03	0,19	12,49	0,98	-6,82	-17,17
BGACr3	3,39	3,64	-0,37	6,76	0,93	-4,36	-10,42
BGACr4	5,75	3,72	0,89	10,66	1,55	-5,60	-14,70
BGACr5	6,45	5,00	-0,62	11,08	1,29	-9,97	-18,95
BGACr6	6,53	2,89	-0,88	8,65	2,26	-6,31	-13,77
BGACr7	7,83	6,21	-0,38	14,09	1,26	-7,33	-18,78
BGACr8	5,30	5,71	-2,02	13,56	0,93	-2,45	-14,10
BGACr9	6,92	6,12	-0,12	13,33	1,13	-9,06	-19,75
BGACr10	4,44	4,14	-1,24	7,43	1,07	-7,06	-13,48
Média	5,89	4,93	-0,71	10,92	1,26	-6,09	-15,37
σ	1,27	1,23	0,62	2,58	0,43	2,56	3,11
C.V.	21,62	25,04	87,15	23,66	34,17	42,12	20,22

Tabela E4. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* impregnadas com SM utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BSMCr1	-3,26	-2,63	-2,86	-8,50	1,24	-9,38	2,96
BSMCr2	-5,57	-4,99	-3,13	-13,08	1,12	-16,46	-5,31
BSMCr3	-5,25	-5,36	-2,26	-12,36	0,98	-16,63	3,43
BSMCr4	-3,83	-3,07	-2,16	-8,79	1,25	-10,10	2,44
BSMCr5	-4,83	-4,14	-2,34	-10,91	1,17	-12,53	2,27
BSMCr6	-3,15	-4,87	-3,04	-10,66	0,65	-11,72	12,40
BSMCr7	-3,12	-4,91	-2,87	-10,52	0,63	-10,57	-2,59
BSMCr8	-3,60	-2,88	-3,70	-9,84	1,25	-13,05	-3,40
BSMCr9	-4,30	-3,56	-2,94	-10,42	1,21	-11,29	-0,64
BSMCr10	-4,37	-4,08	-3,66	-11,62	1,07	-14,71	-0,68
Média	-4,13	-4,05	-2,89	-10,67	1,06	-12,64	1,09
σ	0,88	0,98	0,53	1,44	0,24	2,56	4,96
C.V.	21,39	24,21	18,43	13,49	22,35	20,25	455,74

Tabela E5. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SM, utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMCr1	2,30	1,20	0,50	4,05	1,92	12,13	7,77
BGA-SMCr2	2,70	1,80	0,08	4,64	1,50	11,23	6,30
BGA-SMCr3	3,41	1,00	0,81	5,28	3,41	9,30	3,82
BGA-SMCr4	3,87	1,80	-0,23	5,50	2,15	12,00	6,17
BGA-SMCr5	2,54	2,50	0,98	6,14	1,02	9,00	2,69
BGA-SMCr6	2,91	3,20	0,70	6,94	0,91	8,00	0,99
BGA-SMCr7	3,35	3,00	-0,22	6,22	1,12	14,00	7,32
BGA-SMCr8	3,22	2,50	0,33	6,16	1,29	10,00	3,62
BGA-SMCr9	2,67	1,80	1,60	6,19	1,48	15,00	8,30
BGA-SMCr10	2,38	2,40	1,33	6,23	0,99	8,00	1,67
Média	3,00	2,09	0,51	5,68	1,64	11,18	5,22
σ	0,51	0,72	0,62	0,87	0,76	2,43	2,64
C.V.	16,99	34,65	121,67	15,30	46,27	21,71	50,52

Tabela E6. Variação percentual nos espécimes de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SMB, utilizados no ensaio de compressão perpendicular às fibras.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMBCr1	1,96	0,90	0,70	3,59	2,17	11,65	7,77
BGA-SMBCr2	2,27	1,50	-0,40	3,39	1,51	10,96	7,33
BGA-SMBCr3	2,07	0,70	-0,38	2,39	2,96	10,21	7,63
BGA-SMBCr4	2,69	1,50	0,50	4,76	1,80	11,95	6,87
BGA-SMBCr5	1,43	2,20	0,70	4,39	0,65	11,07	6,40
BGA-SMBCr6	2,49	2,90	0,90	6,42	0,86	9,37	2,77
BGA-SMBCr7	2,15	2,70	6,20	11,41	0,80	12,74	1,19
BGA-SMBCr8	1,98	2,20	-1,80	2,35	0,90	10,53	7,99
BGA-SMBCr9	2,25	1,50	-2,80	0,87	1,50	12,89	11,92
BGA-SMBCr10	1,94	2,10	-0,80	3,25	0,92	9,05	5,62
Média	2,12	1,82	0,28	4,28	1,41	11,04	6,55
σ	0,34	0,72	2,40	2,92	0,74	1,30	2,95
C.V.	16,20	39,77	849,99	68,27	52,41	11,77	44,99

Anexo F.

A seguir se apresentam os gráficos e os valores obtidos de resistência máximo e módulo de elasticidade dos ensaios à compressão perpendicular às fibras. Assim como também os gráficos de resistência contra densidade e resistência contra o conteúdo de umidade.

Figura F1. Gráficos Resistência-Deformação das amostras Natural durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras.

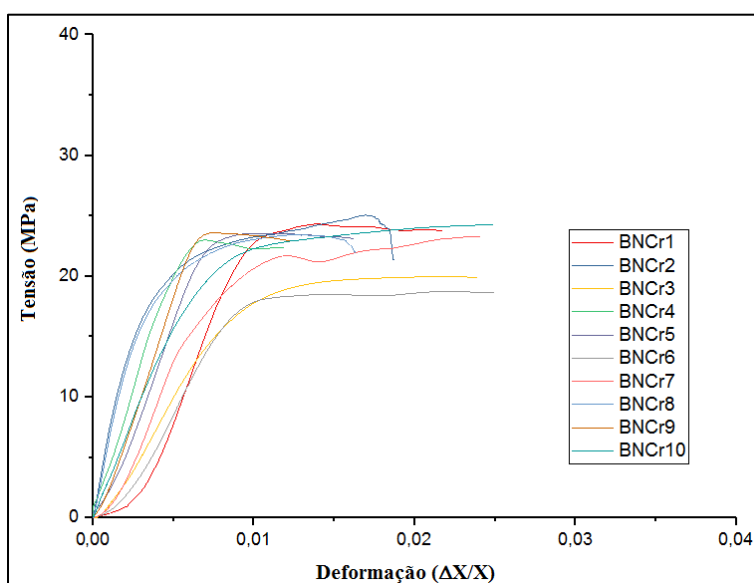


Tabela F1. Parâmetros de resistência à compressão perpendicular às fibras encontrados para os corpos de prova rotulados como Natural

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BNCp1	24,33	18,25	2,91	628	11,10
BNCp2	25,02	18,77	4,14	646	11,21
BNCp3	19,88	14,91	2,14	603	11,56
BNCp4	23,00	17,25	4,08	615	12,50
BNCp5	23,29	17,47	3,77	629	10,76
BNCp6	18,52	13,89	2,48	620	13,73
BNCp7	21,69	16,27	2,84	600	13,28
BNCp8	23,19	17,39	4,51	643	11,17
BNCp9	23,58	17,69	4,18	620	10,81
BNCp10	24,19	18,14	2,83	625	13,94
Média	22,67	17,00	3,39	622,85	12,01
σ	2,06	1,54	0,84	14,74	1,24
C.V.	9,08	9,08	24,65	2,37	10,36

Figura F2. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras rotuladas como Natural

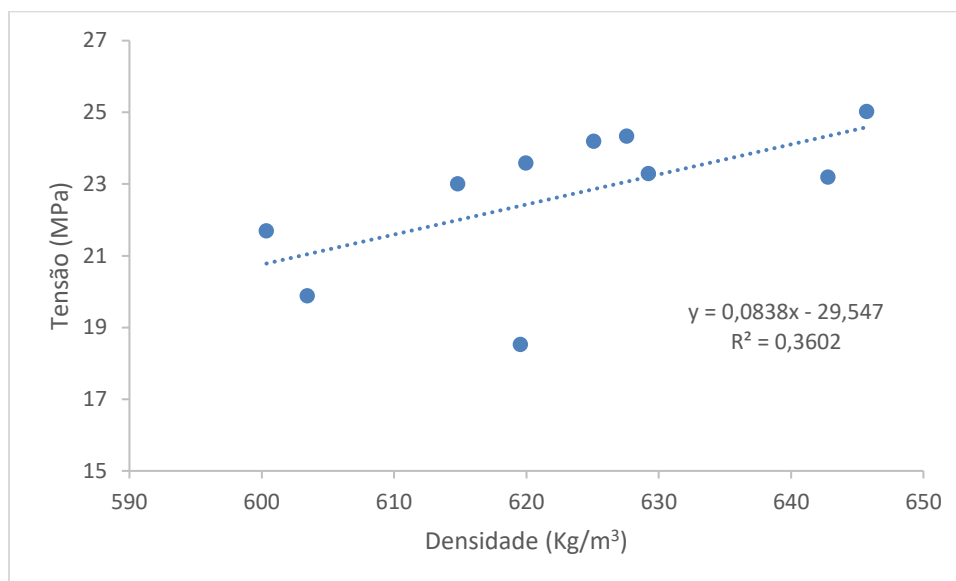


Figura F3. Resistência à compressão paralela às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras rotuladas como Natural

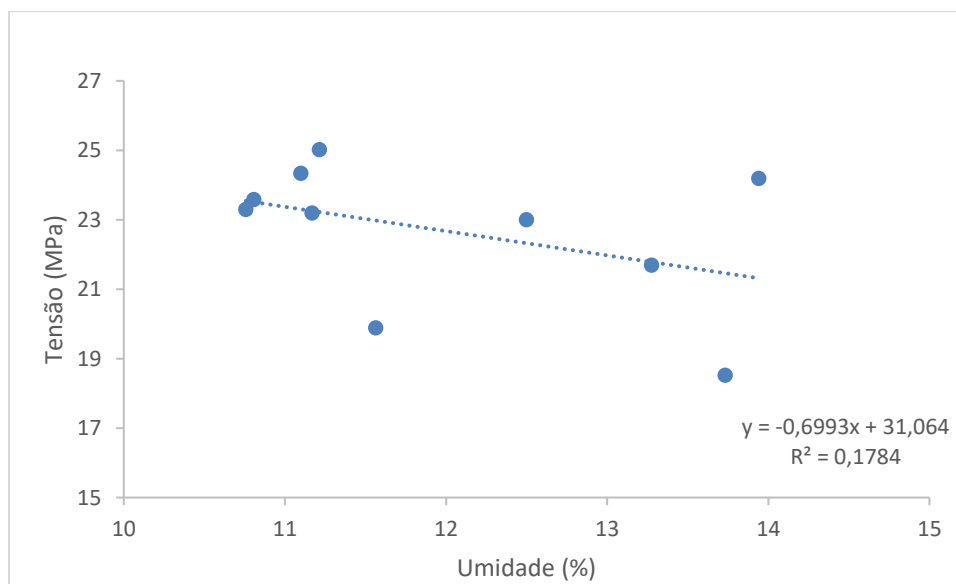


Figura F4. Gráficos Resistência-Deformação das amostras Testemunha térmica durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras.

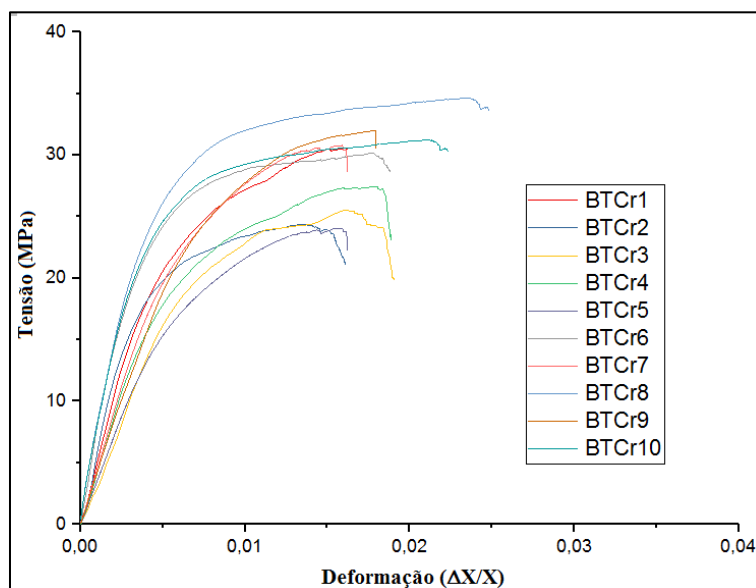


Tabela F2. Parâmetros de resistência à compressão perpendicular às fibras encontrados para os corpos de prova rotulados como Testemunha Térmica.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BTCr1	30,50	22,88	3,36	660	11,10
BTCr2	24,36	18,27	4,20	607	12,61
BTCr3	25,54	19,16	2,81	620	12,34
BTCr4	27,43	20,57	2,74	583	10,94
BTCr5	23,97	17,98	2,44	610	12,47
BTCr6	30,10	22,58	4,89	645	12,51
BTCr7	30,71	23,03	3,19	624	11,54
BTCr8	34,59	25,94	4,62	637	11,52
BTCr9	31,95	23,96	3,08	645	11,81
BTCr10	31,22	23,42	4,70	656	10,61
Média	29,04	21,78	3,60	628,75	11,74
σ	3,54	2,65	0,91	24,38	0,72
C.V.	12,18	12,18	25,33	3,88	6,12

Figura F5. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras rotuladas como Testemunha térmica.

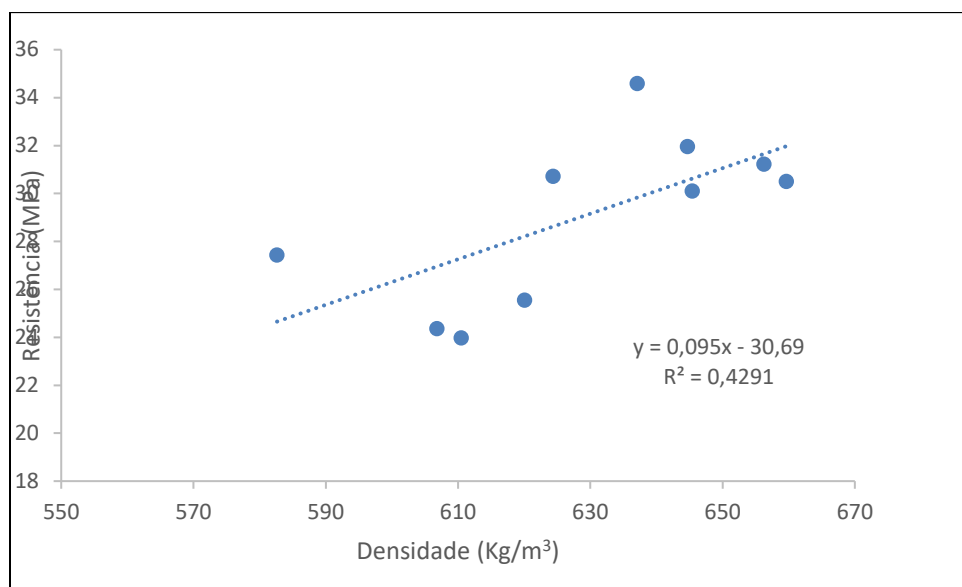


Figura F6. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras rotuladas como testemunha térmica.

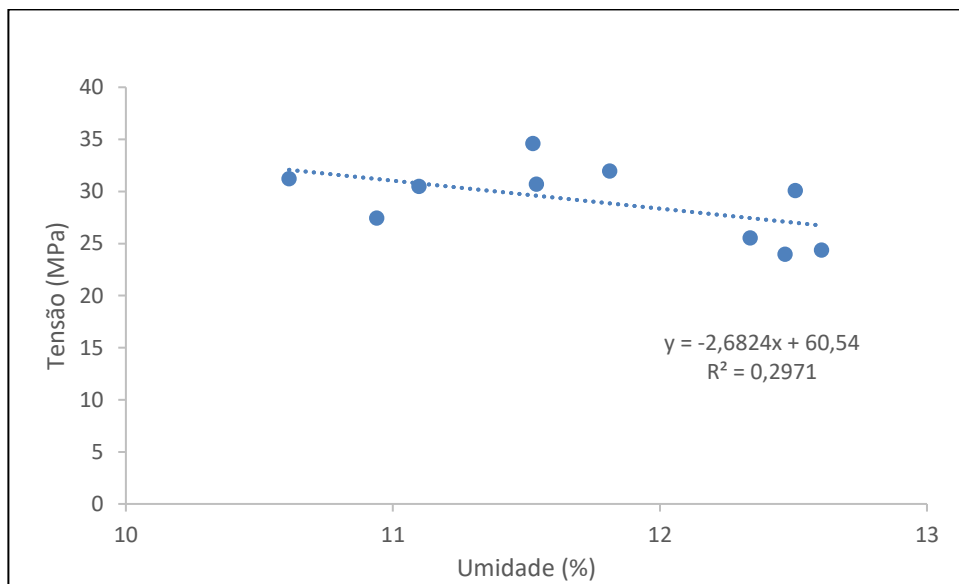


Figura F7. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras.

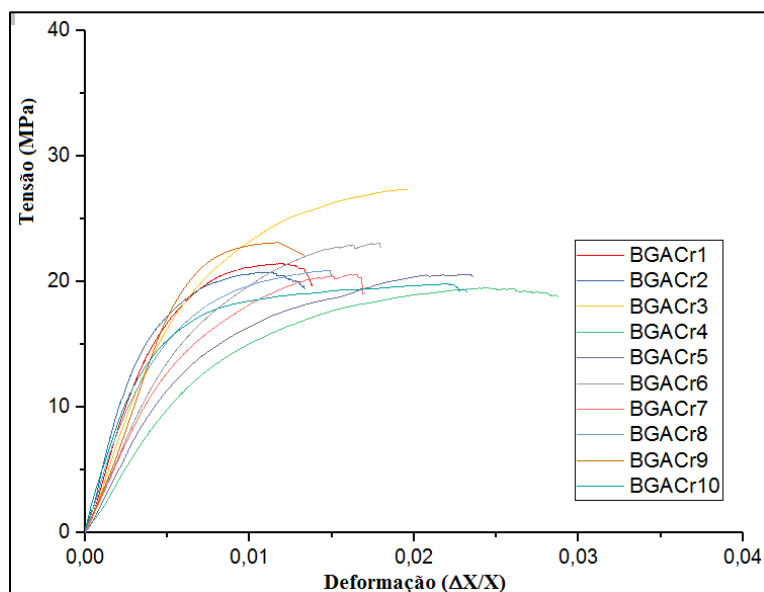


Tabela F3. Parâmetros de resistência à compressão perpendicular às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGACr1	21,41	16,06	3,36	662,87	12,71
BGACr2	20,71	15,53	3,87	630,23	13,04
BGACr3	27,43	20,57	2,51	663,63	9,42
BGACr4	19,49	14,62	1,43	622,34	13,55
BGACr5	20,50	15,38	1,61	645,03	11,38
BGACr6	23,02	17,27	2,18	664,47	12,00
BGACr7	20,53	15,40	2,09	649,27	13,05
BGACr8	20,85	15,64	2,73	641,58	10,65
BGACr9	23,12	17,34	3,63	656,46	9,83
BGACr10	19,85	14,89	2,83	637,81	11,49
Média	21,69	16,27	2,63	647,37	11,71
σ	2,35	1,76	0,83	14,66	1,42
C.V.	10,81	10,81	31,42	2,26	12,11

Figura F8. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA.

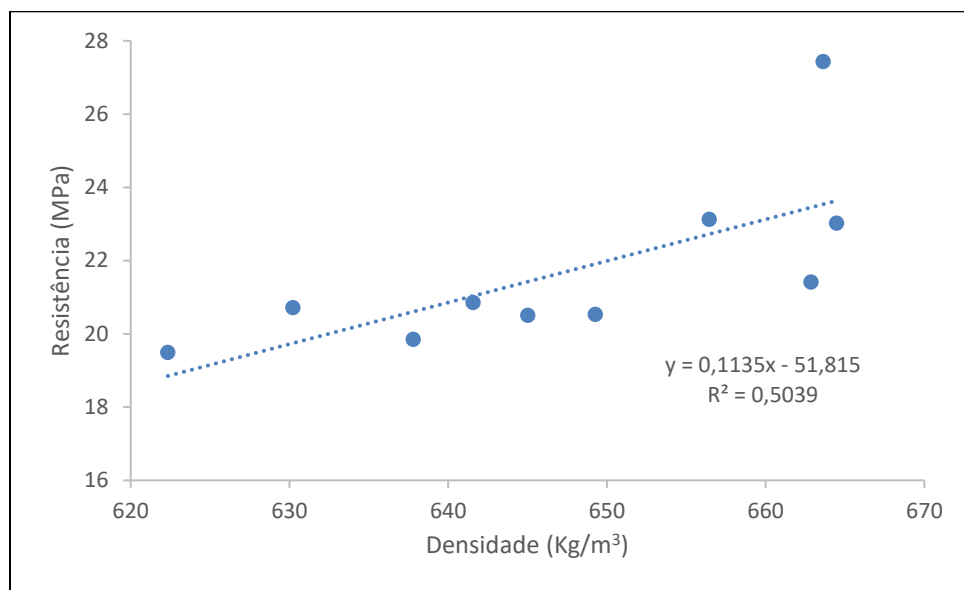


Figura F9. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA.

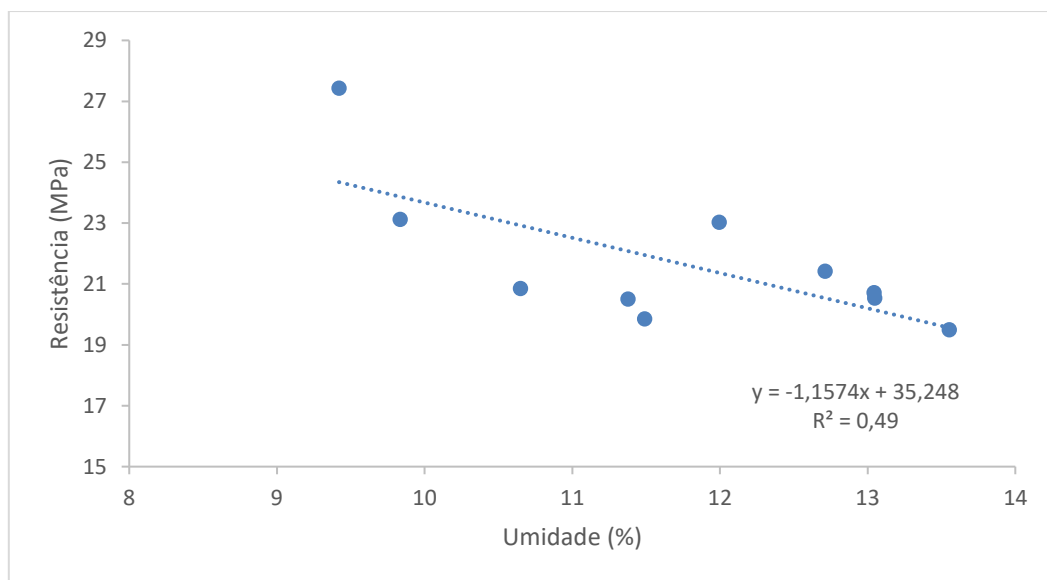


Figura F10. Gráficos Resistência-Deformação das amostras impregnadas com SM durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras.

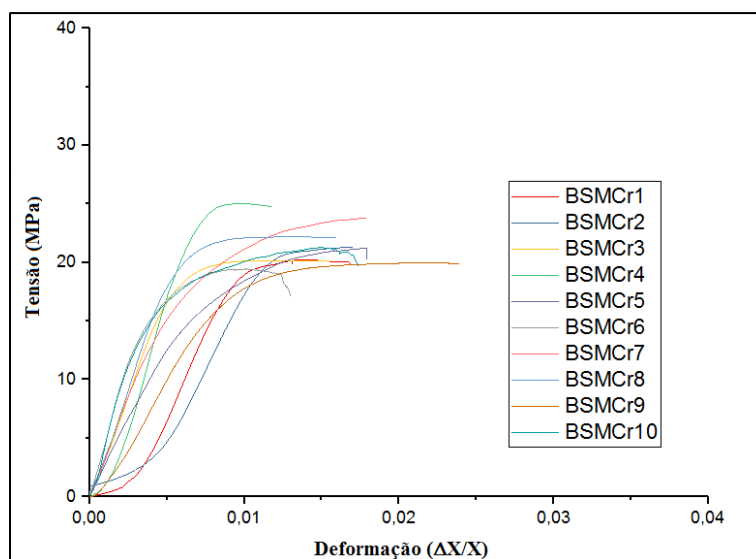


Tabela F4. Parâmetros de resistência à compressão perpendicular às fibras encontrados para os corpos de prova impregnados com SM.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BSMCp1	20,22	15,17	2,85	630,65	13,02
BSMCp2	21,25	15,94	2,21	651,87	8,80
BSMCp3	20,13	15,10	3,69	632,98	14,85
BSMCp4	25,03	18,77	4,44	654,59	10,38
BSMCp5	21,17	15,88	2,08	639,03	10,15
BSMCp6	19,41	14,56	3,90	633,48	17,51
BSMCp7	23,77	17,83	2,67	645,03	10,05
BSMCp8	22,14	16,61	3,81	639,52	11,21
BSMCp9	19,96	14,97	2,20	631,43	16,81
BSMCp10	21,25	15,94	3,34	642,86	10,31
Média	21,43	16,07	3,12	640,14	12,31
σ	1,78	1,33	0,83	8,44	3,08
C.V.	8,30	8,30	26,71	1,32	25,01

Figura F11. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras impregnadas com SM

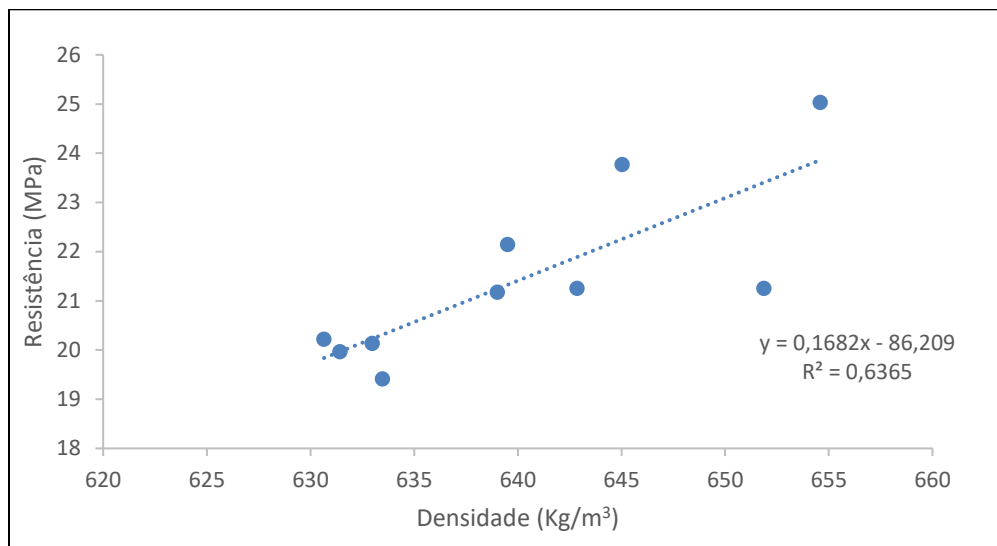


Figura F12. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras impregnadas com SM.

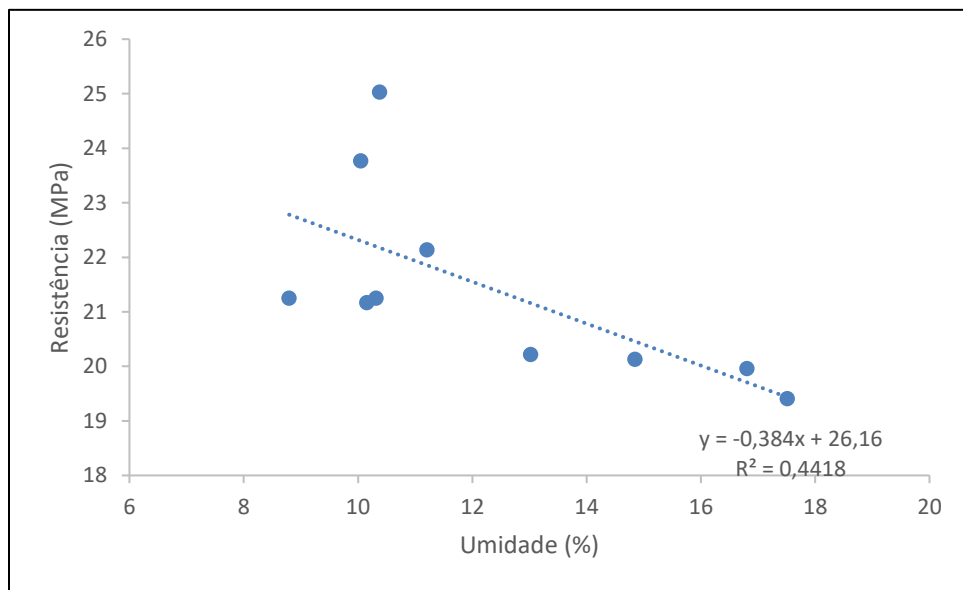


Figura F13. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras.

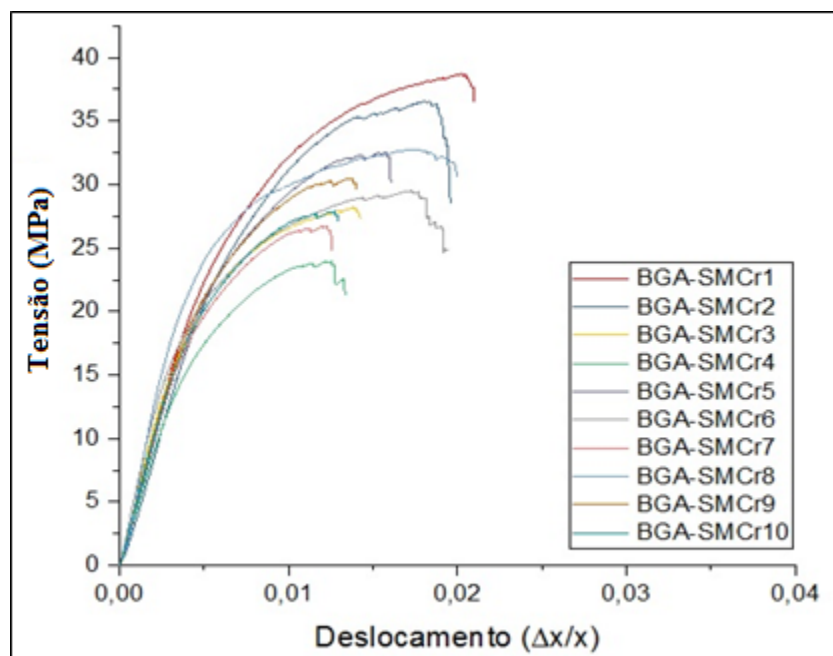


Tabela F5. Parâmetros de resistência à compressão perpendicular às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA e impregnadas com SM.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGA-SMCr1	35,43	26,57	3,30	656	12,59
BGA-SMCr2	36,57	27,43	3,24	673	10,84
BGA-SMCr3	28,04	21,03	3,59	628	12,80
BGA-SMCr4	28,00	21,00	3,50	651	14,06
BGA-SMCr5	32,34	24,26	3,36	671	12,61
BGA-SMCr6	29,44	22,08	3,27	648	12,50
BGA-SMCr7	26,44	19,83	3,37	628	12,65
BGA-SMCr8	32,72	24,54	4,50	655	11,52
BGA-SMCr9	30,21	22,66	3,69	632	12,93
BGA-SMCr10	27,62	20,72	3,71	624	14,32
Média	30,68	23,01	3,55	646,52	12,68
σ	3,45	2,59	0,37	17,90	1,02
C.V.	11,26	11,26	10,49	2,77	8,08

Figura F14. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM.

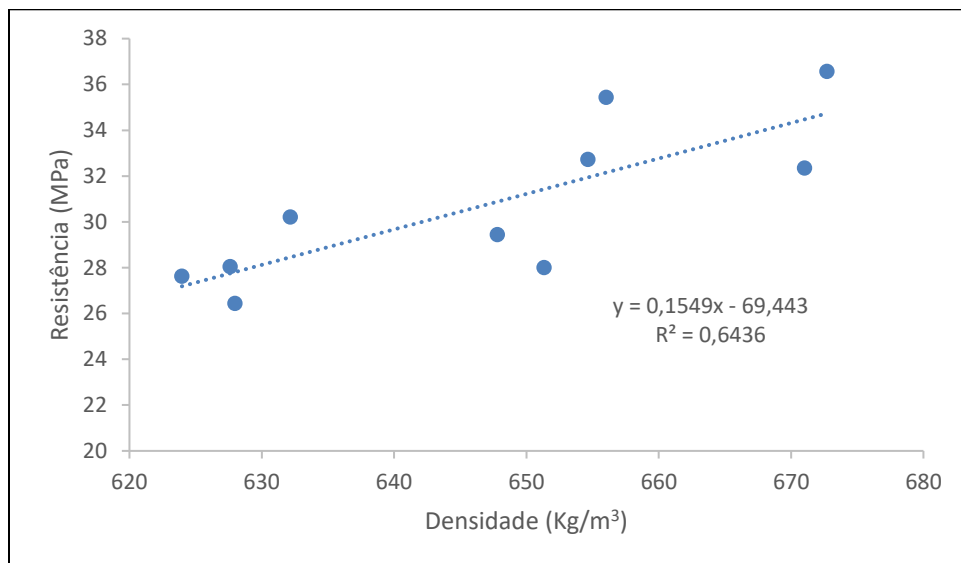


Figura F15. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM.

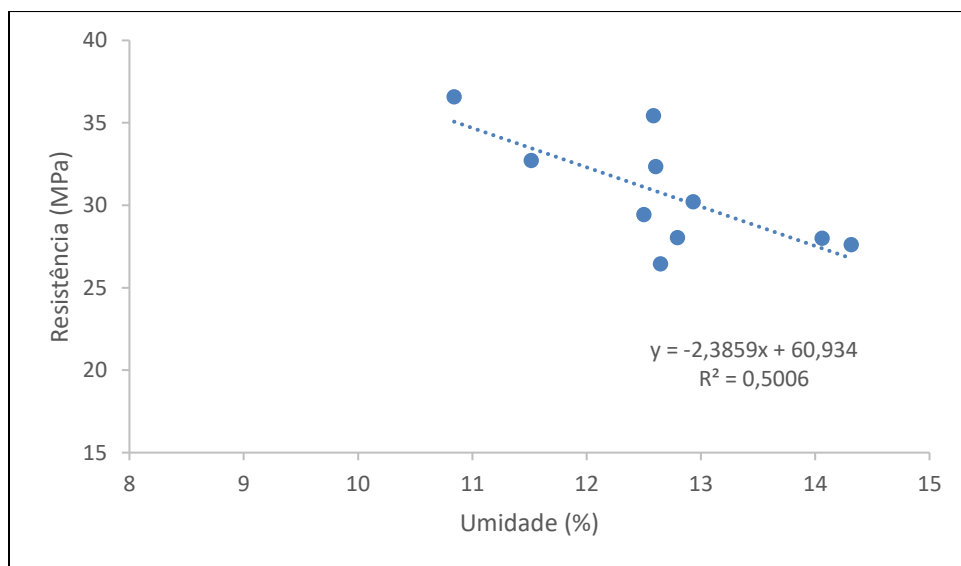


Figura F16. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB durante os ensaios à compressão perpendicular às fibras.

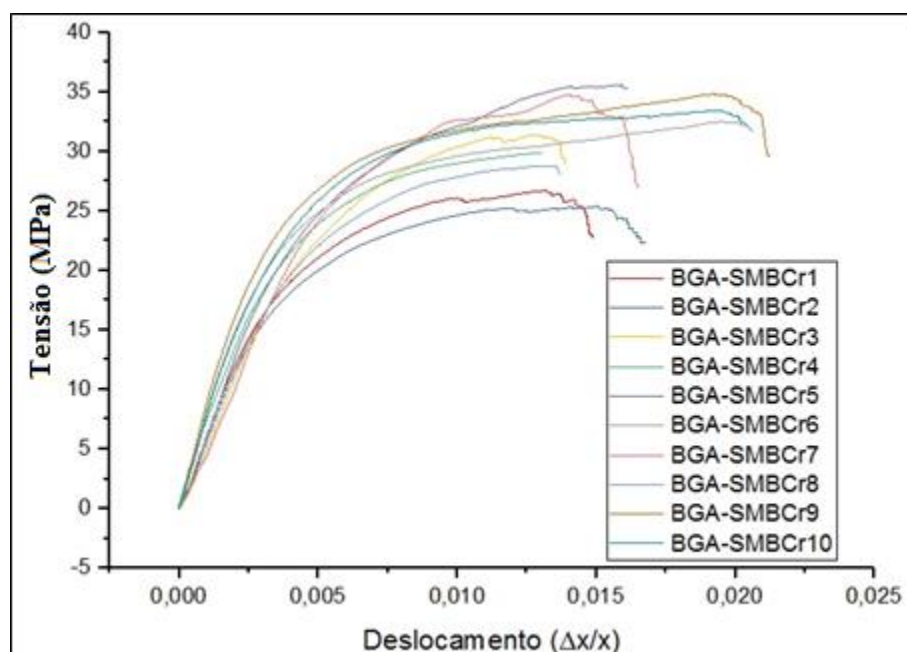


Tabela F6. Parâmetros de resistência à compressão perpendicular às fibras encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA e impregnadas com SMB.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGA-SMBCr1	26,70	20,03	4,05	635	11,72
BGA-SMBCr2	25,18	18,89	4,06	615	12,12
BGA-SMBCr3	31,37	23,53	4,11	658	9,64
BGA-SMBCr4	29,79	22,34	4,60	662	13,51
BGA-SMBCr5	35,49	26,62	4,15	690	10,16
BGA-SMBCr6	32,41	24,31	4,48	644	10,94
BGA-SMBCr7	34,76	26,07	4,35	670	9,25
BGA-SMBCr8	28,76	21,57	4,28	653	11,52
BGA-SMBCr9	34,76	26,07	5,13	665	9,41
BGA-SMBCr10	33,38	25,04	4,94	671	10,14
Média	31,26	23,45	4,41	656,26	10,84
σ	3,57	2,67	0,37	21,05	1,37
C.V.	11,40	11,40	8,49	3,21	12,68

Figura F17. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB.

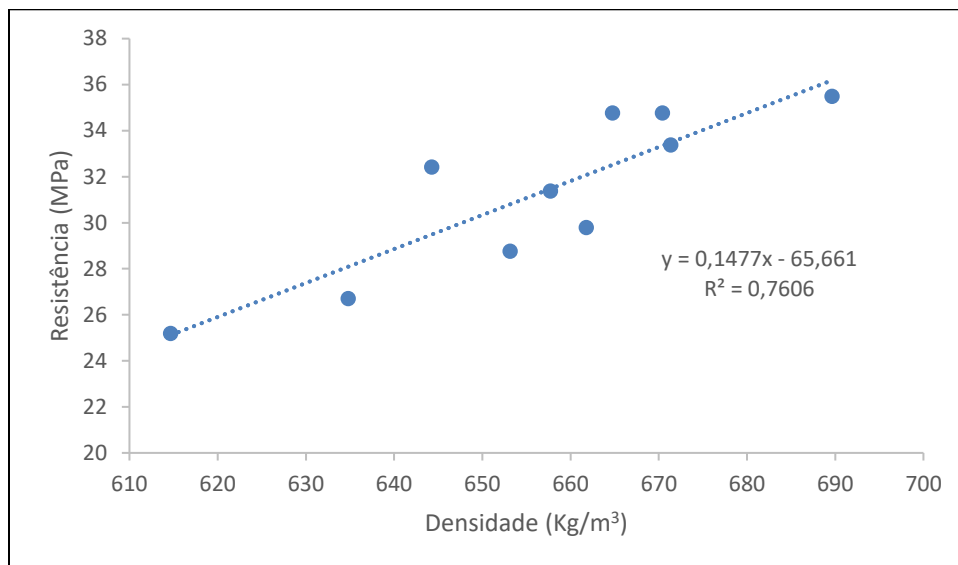
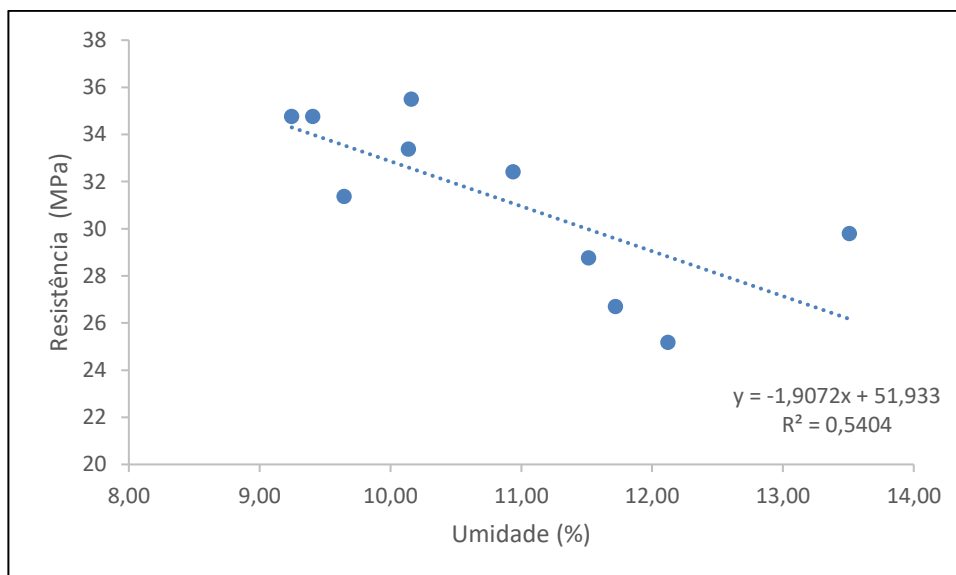


Figura F18. Resistência à compressão perpendicular às fibras em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB.



Anexo G. Impregnação dos espécimens de bambu *B. vulgaris* com copolímeros, utilizados no ensaio de flexão.

Em seguida, se apresentam os dados obtidos durante o processo de infiltração nos diferentes corpos de provas utilizados nos ensaios mecânicos, como indicam os rótulos das amostras. Nas Tabelas se encontram as medidas percentuais da variação da espessura (t), largura (b), comprimento (L), volume (V), coeficiente de anisotropia (c.a.), massa (m) e densidade (d).

Tabela G1. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* natural utilizados no ensaio de flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BNF1	-5,09	-4,17	-2,82	-11,61	1,22	-15,27	-4,09
BNF2	-7,61	-6,08	-2,09	-15,10	1,25	-16,95	-2,24
BNF3	-6,83	-5,74	-2,04	-13,97	1,19	-14,63	-0,76
BNF4	-1,15	-3,06	-2,63	-6,63	0,38	-9,96	-3,61
BNF5	-5,14	-4,75	-2,79	-12,10	1,08	-13,91	-2,10
BNF6	-5,40	-3,91	-2,64	-11,50	1,38	-14,84	-3,74
BNF7	-1,61	-1,64	-2,69	-5,88	0,98	-12,98	-7,50
BNF8	-3,98	-3,73	-2,13	-9,48	1,07	-11,27	-1,98
BNF9	-6,52	-5,43	-2,66	-13,95	1,20	-14,58	-0,67
BNF10	-1,52	-2,04	-1,45	-4,96	0,75	-9,07	-4,26
Média	-4,49	-4,06	-2,40	-10,52	1,05	-13,35	-3,09
σ	2,35	1,50	0,45	3,62	0,29	2,51	2,02
C.V.	52,29	37,08	18,59	34,41	27,97	18,78	65,27

Tabela G2. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* utilizados como testemunha térmica no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BTF1	-11,14	-8,80	-2,15	-20,70	1,27	-27,11	-8,08
BTF2	-5,92	-2,71	0,51	-8,00	2,18	-24,14	-17,54
BTF3	-8,24	-7,40	-1,64	-16,43	1,11	-25,75	-11,15
BTF4	-9,56	-6,07	-2,12	-16,85	1,58	-23,90	-8,48
BTF5	-8,89	-8,21	-2,94	-18,82	1,08	-22,26	-4,24
BTF6	-8,08	-6,70	-3,48	-17,22	1,21	-22,48	-6,35
BTF7	-6,71	-6,22	-3,57	-15,64	1,08	-28,24	-14,94
BTF8	-9,55	-7,00	-2,50	-17,98	1,36	-17,51	0,58
BTF9	-5,18	-3,08	-3,88	-11,66	1,68	-21,74	-11,41
BTF10	-8,31	-4,32	-2,33	-14,32	1,93	-22,16	-9,15
Média	-8,16	-6,05	-2,41	-15,76	1,45	-23,53	-9,08
σ	1,81	2,07	1,26	3,68	0,38	3,06	5,18
C.V.	22,1	34,1	52,1	23,3	26,5	13,0	57,0

Tabela G3. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com FAA utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BFAAF1	-4,01	-6,79	-2,11	-12,41	0,59	-21,05	-9,86
BFAAF2	-4,47	-7,69	-1,59	-13,22	0,58	-13,64	-0,48
BFAAF3	-3,61	-5,47	-3,35	-11,94	0,66	-20,20	-9,38
BFAAF4	-8,44	-8,53	-2,13	-18,03	0,99	-26,82	-10,72
BFAAF5	-4,14	-9,80	-2,32	-15,54	0,42	-21,51	-7,08
BFAAF6	-6,12	-9,25	-1,32	-15,93	0,66	-20,97	-6,00
BFAAF7	-4,32	-8,75	-2,53	-14,90	0,49	-19,95	-5,93
BFAAF8	-5,97	-5,89	-3,09	-14,24	1,01	-14,29	-0,06
BFAAF9	-4,62	-6,61	-2,14	-12,83	0,70	-22,73	-11,36
BFAAF10	-3,98	-7,10	-2,31	-12,86	0,56	-15,44	-2,96
Média	-4,97	-7,59	-2,29	-14,19	0,67	-19,66	-6,38
σ	1,48	1,46	0,61	1,91	0,19	4,10	4,11
C.V.	29,70	19,20	26,63	13,48	29,12	20,83	64,40

Tabela G4. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltrados com GA 2,5% utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGAF1	2,62	2,67	2,53	8,03	0,98	-8,25	-15,07
BGAF2	2,81	2,94	1,44	7,35	0,95	-10,08	-16,24
BGAF3	1,16	1,41	1,07	3,69	0,82	-7,88	-11,15
BGAF4	3,88	1,88	3,65	9,70	2,06	-8,05	-16,19
BGAF5	3,15	1,74	1,75	6,78	1,80	-10,92	-16,58
BGAF6	4,45	0,87	0,04	5,39	5,10	-11,42	-15,95
BGAF7	4,18	2,62	1,19	8,19	1,60	-8,19	-15,14
BGAF8	3,75	4,15	1,70	9,89	0,90	-10,21	-18,29
BGAF9	3,80	3,03	0,10	7,05	1,25	-15,86	-21,40
BGAF10	1,70	1,41	-0,90	2,20	1,21	-10,46	-12,38
Média	3,31	2,37	1,26	6,83	1,72	-10,10	-15,84
σ	1,01	0,99	1,31	2,46	1,34	2,55	2,84
C.V.	30,55	41,88	104,03	36,09	77,97	25,21	17,96

Tabela G5. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* impregnadas com SM utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BSMF1	-5,23	-4,35	-3,00	-12,08	1,20	-15,43	5,80
BSMF2	-7,82	-6,26	-2,28	-15,56	1,25	-17,11	-2,35
BSMF3	-7,07	-5,94	-2,23	-14,53	1,19	-14,79	3,24
BSMF4	-1,35	-3,26	-2,82	-7,26	0,41	-10,13	-1,67
BSMF5	-5,36	-4,91	-2,98	-12,68	1,09	-14,08	4,88
BSMF6	-5,53	-4,10	-2,83	-11,96	1,35	-15,00	7,42
BSMF7	-1,80	-1,82	-2,88	-6,37	0,99	-13,15	-11,70
BSMF8	-4,16	-3,92	-2,32	-10,05	1,06	-11,44	-1,77
BSMF9	-6,75	-5,63	-2,85	-14,51	1,20	-14,74	6,62
BSMF10	-1,72	-2,22	-1,64	-5,48	0,77	-9,25	-4,00
Média	-4,68	-4,24	-2,58	-11,05	1,05	-13,51	0,65
σ	2,35	1,50	0,44	3,61	0,28	2,50	6,03
C.V.	50,27	35,47	17,21	32,70	26,18	18,51	932,18

Tabela G6. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SM, utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMF1	1,50	1,20	0,37	3,10	1,25	8,43	5,17
BGA-SMF2	1,10	1,80	0,18	3,11	0,61	9,80	6,49
BGA-SMF3	1,60	1,00	0,51	3,14	1,60	5,04	1,84
BGA-SMF4	2,20	1,80	0,97	5,04	1,22	6,55	1,43
BGA-SMF5	3,35	2,50	0,50	6,46	1,34	11,00	4,26
BGA-SMF6	2,88	3,20	0,70	6,92	0,90	10,06	2,94
BGA-SMF7	3,32	3,00	0,08	6,51	1,11	11,70	4,87
BGA-SMF8	3,20	2,50	0,55	6,36	1,28	10,86	4,23
BGA-SMF9	1,81	1,80	0,78	4,45	1,01	11,00	6,27
BGA-SMF10	2,35	2,40	0,89	5,74	0,98	10,70	4,69
Média	2,33	2,09	0,52	5,01	1,15	9,38	4,17
σ	0,82	0,72	0,29	1,54	0,27	2,18	1,70
C.V.	35,36	34,65	56,14	30,76	23,81	23,25	40,76

Tabela G7. Variação percentual nos espécimens de *B. vulgaris* infiltradas com GA 2,5% e impregnadas com SMB, utilizados no ensaio a flexão.

Rotulo	h	b	L	V	c.a.	massa	d
BGA-SMBF1	1,84	0,70	1,20	3,78	2,63	11,20	7,15
BGA-SMBF2	1,44	1,30	1,80	4,61	1,11	11,80	6,87
BGA-SMBF3	1,94	0,50	1,00	3,47	3,88	11,00	7,27
BGA-SMBF4	2,54	1,30	1,80	5,74	1,95	11,80	5,73
BGA-SMBF5	1,34	2,00	2,50	5,95	0,67	12,50	6,18
BGA-SMBF6	1,64	2,70	3,20	7,72	0,61	13,20	5,08
BGA-SMBF7	2,04	2,50	3,00	7,73	0,82	13,00	4,89
BGA-SMBF8	1,84	2,00	2,50	6,47	0,92	12,50	5,66
BGA-SMBF9	1,34	1,30	1,80	4,51	1,03	11,80	6,98
BGA-SMBF10	1,04	1,90	2,40	5,43	0,55	12,40	6,61
Média	1,70	1,62	2,12	5,54	1,42	12,12	6,24
σ	0,43	0,72	0,72	1,49	1,09	0,72	0,86
C.V.	25,44	44,68	34,15	26,86	76,80	5,97	13,85

Anexo H.

A seguir se apresentam os gráficos e os valores obtidos de resistência máxima e módulo de elasticidade dos ensaios a Flexão. Assim como também os gráficos de resistência contra densidade e resistência contra o conteúdo de umidade.

Figura H1. Gráficos Resistência-Deformação das amostras Natural durante os ensaios a flexão

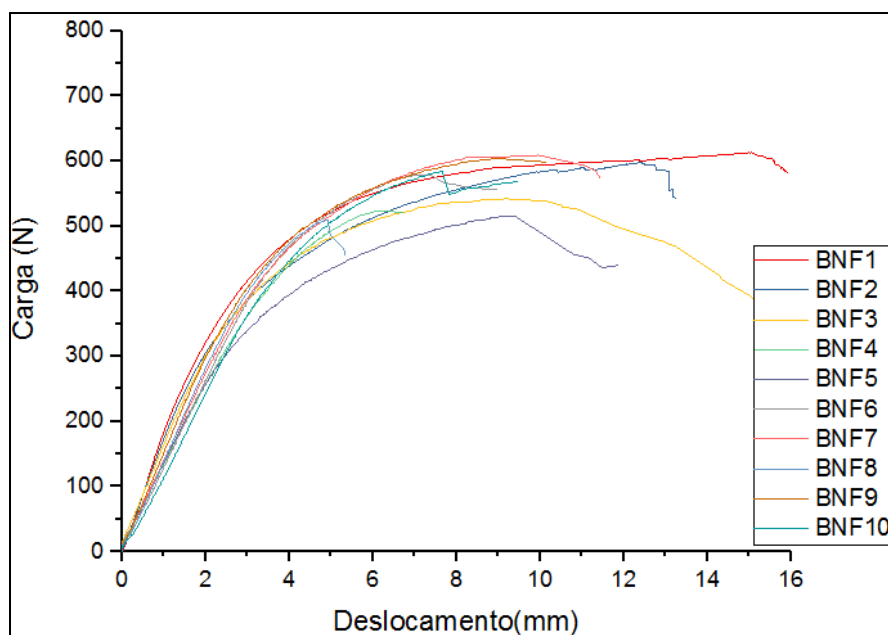


Tabela H1. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova rotulados como Natural

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m³)	(%)
BNF1	116,44	87,33	9,14	654	10,09
BNF2	109,12	81,84	7,10	644	12,02
BNF3	94,88	71,16	7,98	600	13,27
BNF4	97,27	72,95	8,84	618	12,82
BNF5	96,34	72,25	7,36	621	13,90
BNF6	101,74	76,30	8,78	640	10,50
BNF7	106,04	79,53	8,33	629	10,03
BNF8	93,05	69,79	6,95	613	14,15
BNF9	100,86	75,65	7,53	644	12,96
BNCp10	102,80	77,10	8,31	621	10,57
Média	101,85	76,39	8,03	628	12,03
σ	7,17	5,38	0,77	16,76	1,61
C.V.	7,04	7,04	9,62	2,67	13,37

Figura H2. Resistência a flexão em função da densidade das amostras rotuladas como Natural

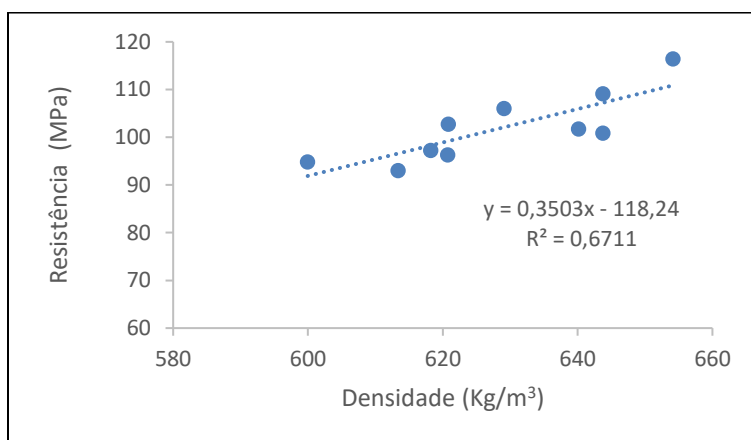


Figura H3. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras rotuladas como Natural

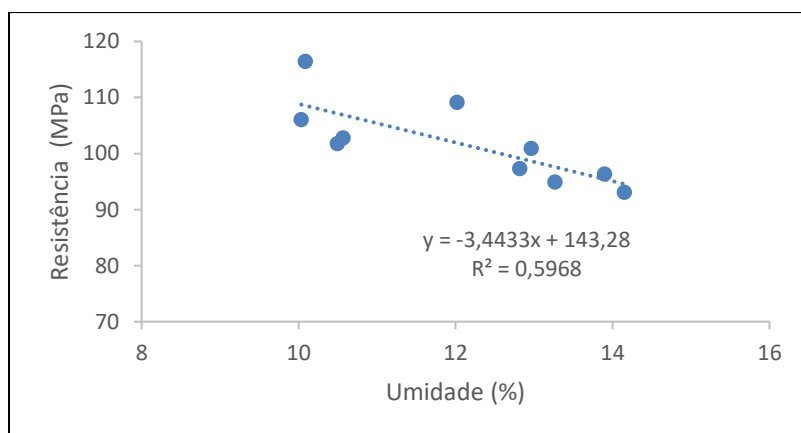


Figura H4. Gráficos Resistência-Deformação das amostras Testemunha térmica durante os ensaios a flexão.

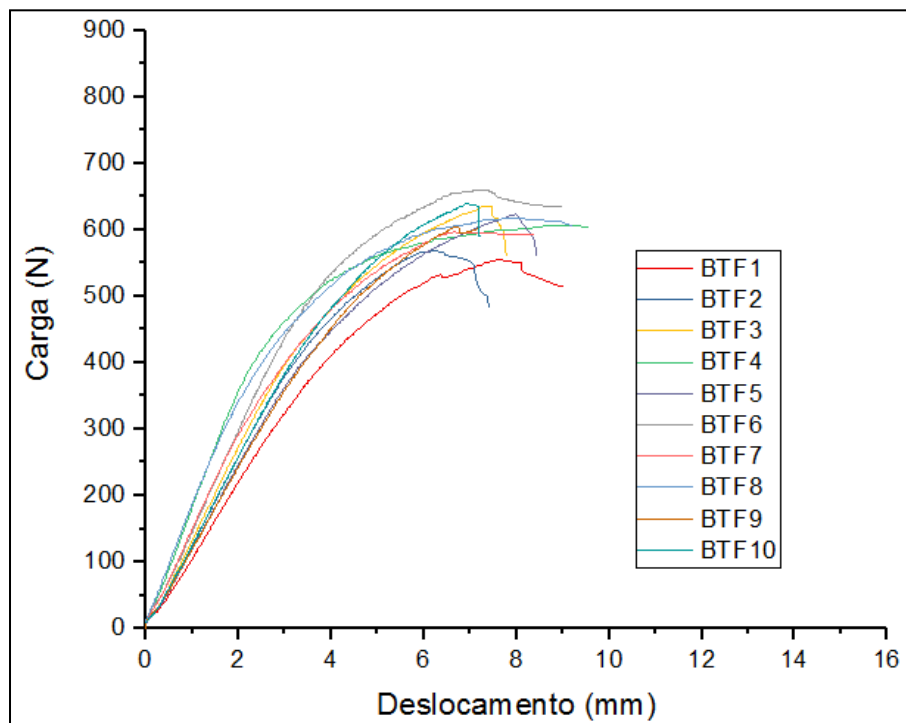


Tabela H2. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova rotulados como Testemunha Térmica.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BTF1	116,01	87,01	9,65	677	9,50
BTF2	103,97	77,97	10,82	662	10,00
BTF3	119,48	89,61	10,03	676	9,48
BTF4	101,29	75,97	10,33	577	13,64
BTF5	115,65	86,73	8,57	652	9,05
BTF6	114,54	85,91	9,60	637	10,48
BTF7	103,40	77,55	8,27	607	12,68
BTF8	105,99	79,49	8,98	592	11,69
BTF9	121,76	91,32	10,40	673	10,29
BTF10	104,82	78,62	7,66	587	13,01
Média	110,69	83,02	9,43	633,95	10,98
σ	7,53	5,65	1,03	39,70	1,65
C.V.	6,81	6,81	10,93	6,26	15,02

Figura H5. Resistência a flexão em função da densidade das amostras rotuladas como Testemunha térmica.

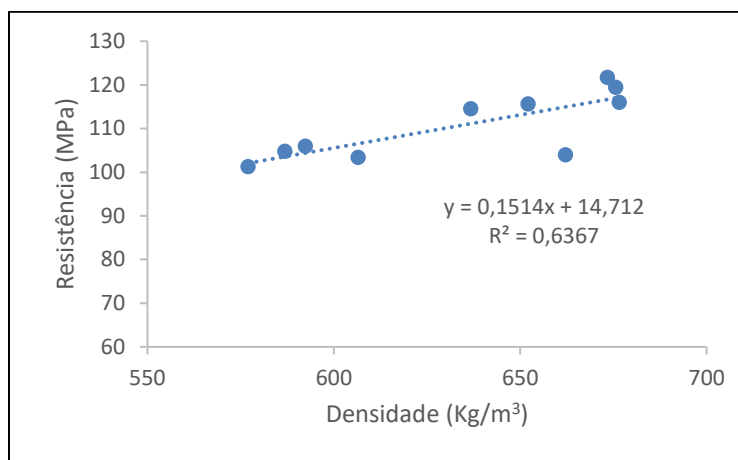


Figura H6. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras rotuladas como Testemunha térmica.

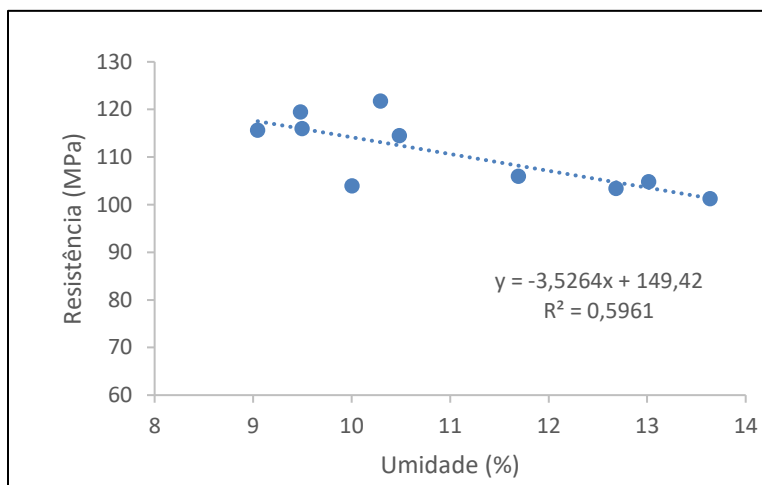


Figura H7. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução FAA durante os ensaios a flexão.

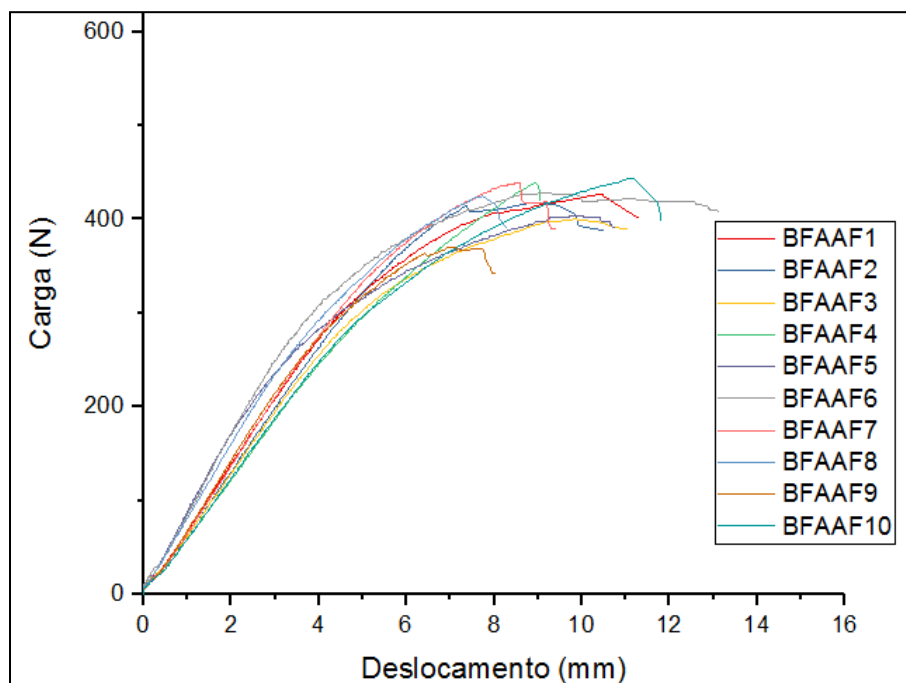


Tabela H3. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução FAA.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BFAAF1	89,82	67,37	9,07	620	10,59
BFAAF2	97,51	73,14	9,03	656	12,25
BFAAF3	94,79	71,09	8,33	632	11,24
BFAAF4	94,15	70,61	9,41	657	10,37
BFAAF5	94,76	71,07	8,96	641	9,48
BFAAF6	93,33	69,99	9,74	649	8,45
BFAAF7	80,80	60,60	10,08	671	7,99
BFAAF8	83,67	62,75	8,89	661	11,40
BFAAF9	82,57	61,93	7,95	621	10,79
BFAAF10	94,49	70,87	9,42	668	8,73
Média	90,59	67,94	9,09	647,57	10,13
σ	6,03	4,52	0,63	18,44	1,41
C.V.	6,66	6,66	6,91	2,85	13,89

Figura H8. Resistência a flexão em função da densidade das amostras infiltradas com solução FAA.

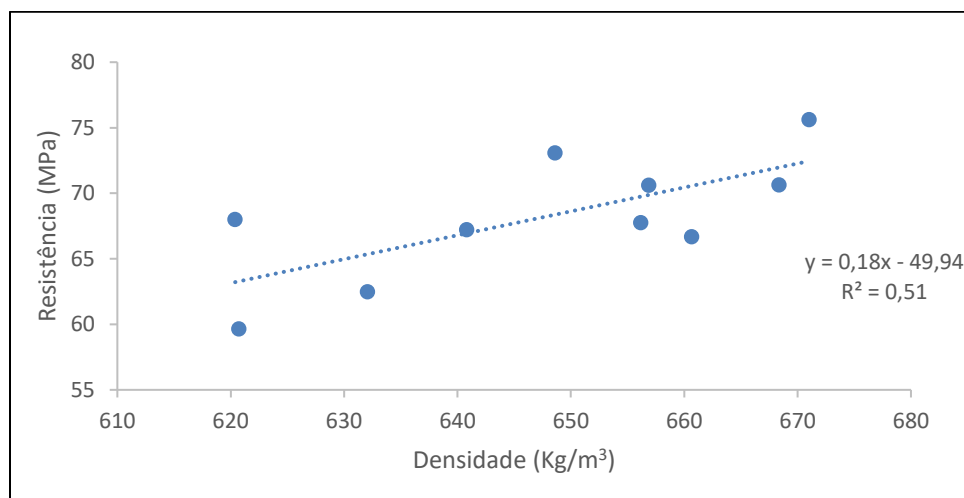


Figura H9. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução FAA.

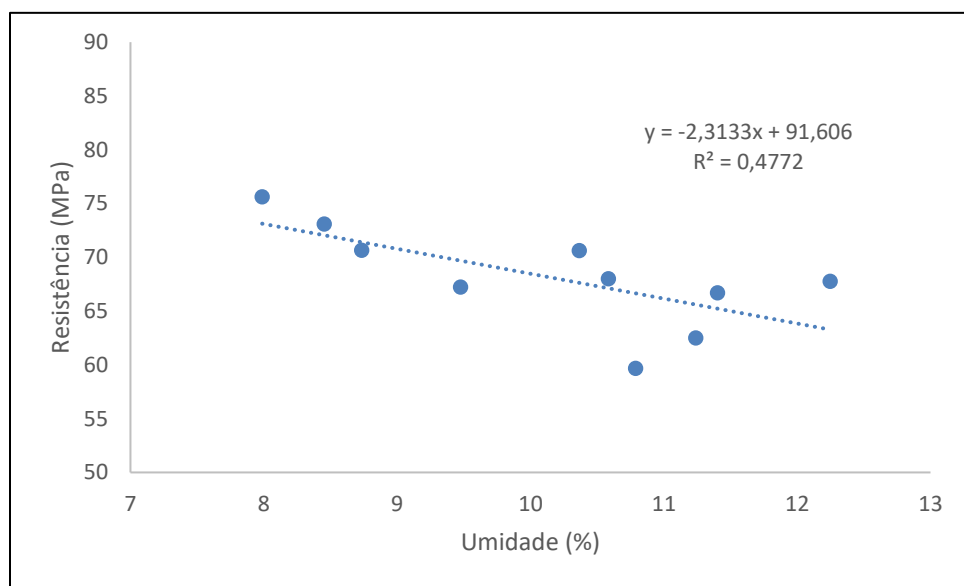


Figura H10. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA durante os ensaios a flexão.

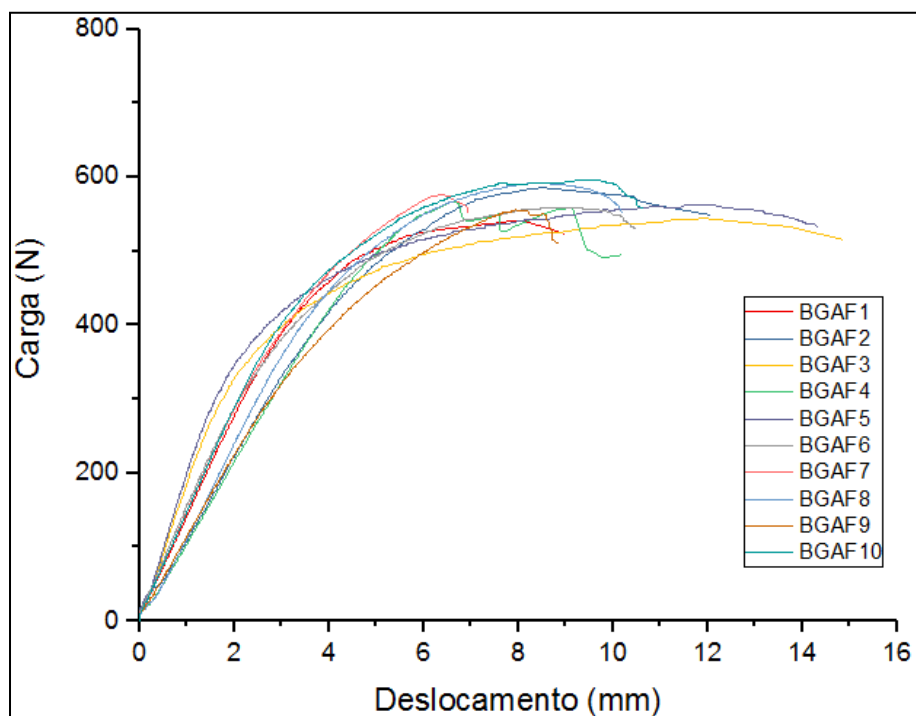


Tabela H4. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGAF1	107,24	80,43	10,55	672	13,81
BGAF2	108,42	81,31	7,52	655	14,89
BGAF3	109,47	82,10	10,39	637	13,63
BGAF4	111,68	83,76	10,07	652	12,79
BGAF5	100,95	75,71	10,16	612	14,55
BGAF6	99,08	74,31	7,25	619	14,63
BGAF7	114,90	86,18	9,92	678	11,44
BGAF8	109,83	82,37	9,22	645	14,00
BGAF9	111,37	83,52	8,05	700	10,93
BGAF10	110,74	83,05	9,52	648	12,60
Média	108,37	81,28	9,27	651,89	13,33
σ	4,88	3,66	1,22	26,65	1,36
C.V.	4,50	4,50	13,19	4,09	10,18

Figura H11. Resistência a flexão em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA.

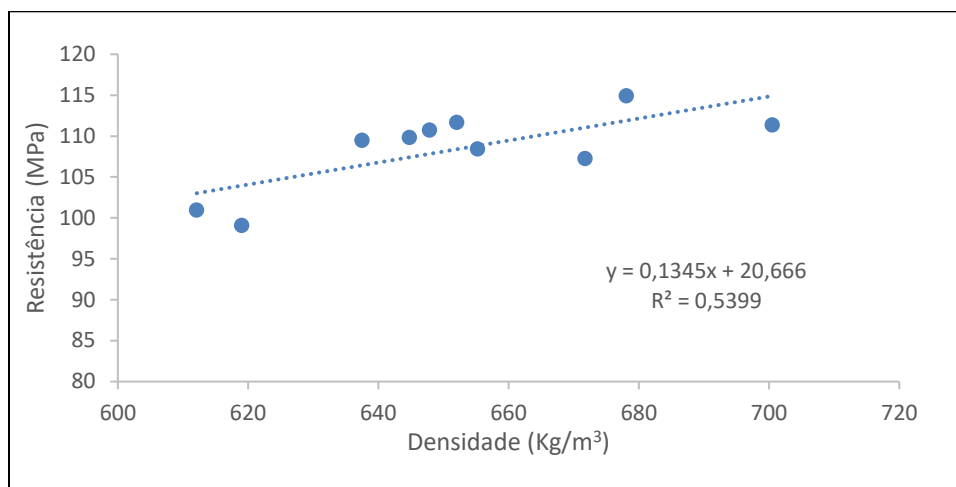


Figura H12. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA.

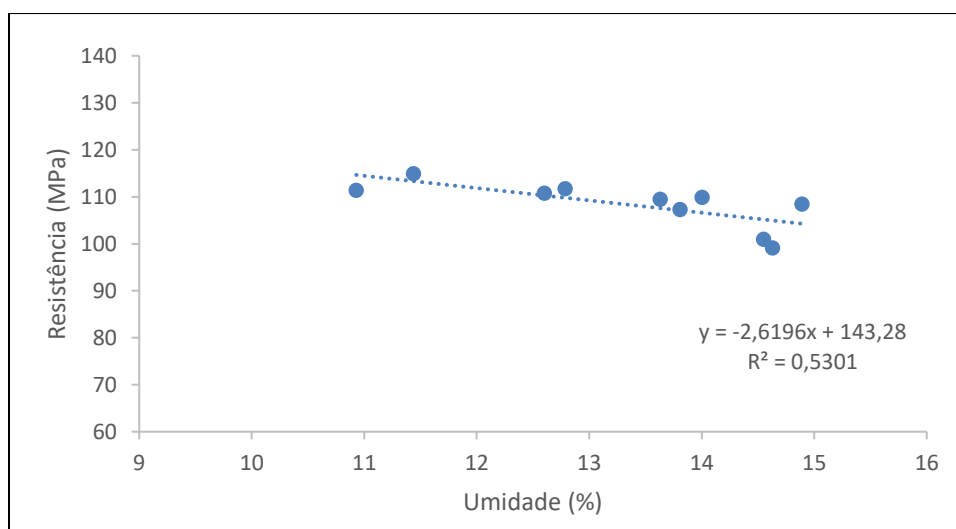


Figura H13. Gráficos Resistência-Deformação das amostras impregnadas com SM durante os ensaios a flexão.

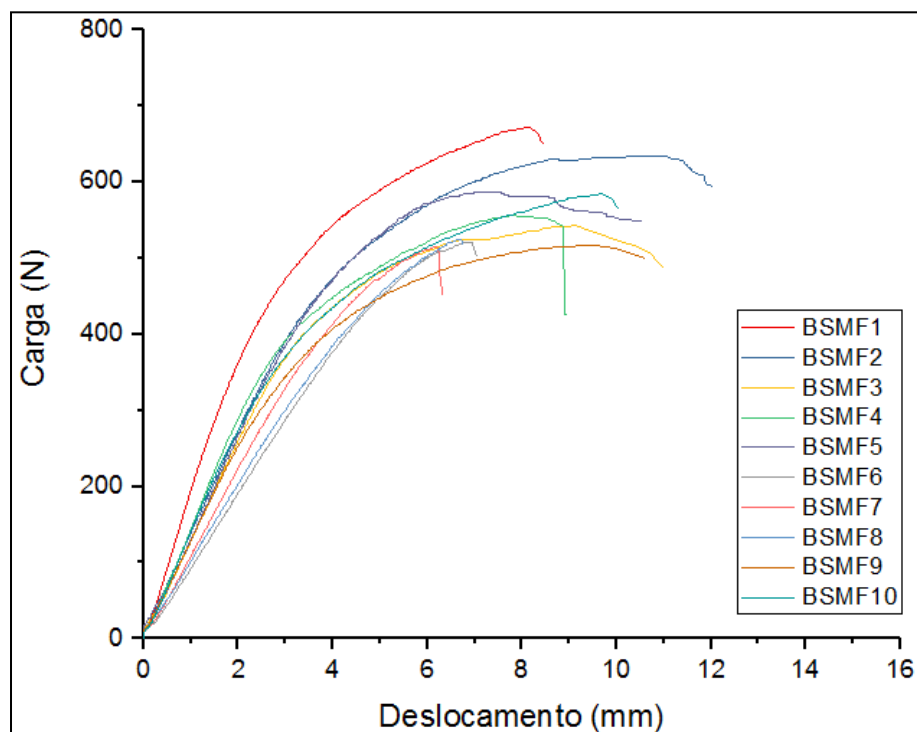


Tabela H5. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova impregnados com SM.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densida de	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m³)	(%)
BSMF1	116,93	87,70	10,10	691	10,54
BSMF2	128,76	96,57	11,03	703	10,31
BSMF3	112,83	84,62	10,88	702	10,18
BSMF4	103,24	77,43	9,49	684	14,82
BSMF5	116,43	87,33	11,37	708	11,53
BSMF6	108,69	81,52	9,82	691	9,77
BSMF7	100,43	75,32	9,74	677	12,08
BSMF8	102,17	76,63	8,46	668	15,82
BSMF9	101,38	76,04	8,72	672	13,94
BSMF10	102,29	76,72	7,51	662	14,28
Média	109,32	81,99	9,71	685,89	12,33
σ	9,30	6,98	1,22	15,98	2,21
C.V.	8,51	8,51	12,58	2,33	17,93

Figura H14. Resistência a flexão em função da densidade das amostras impregnadas com SM

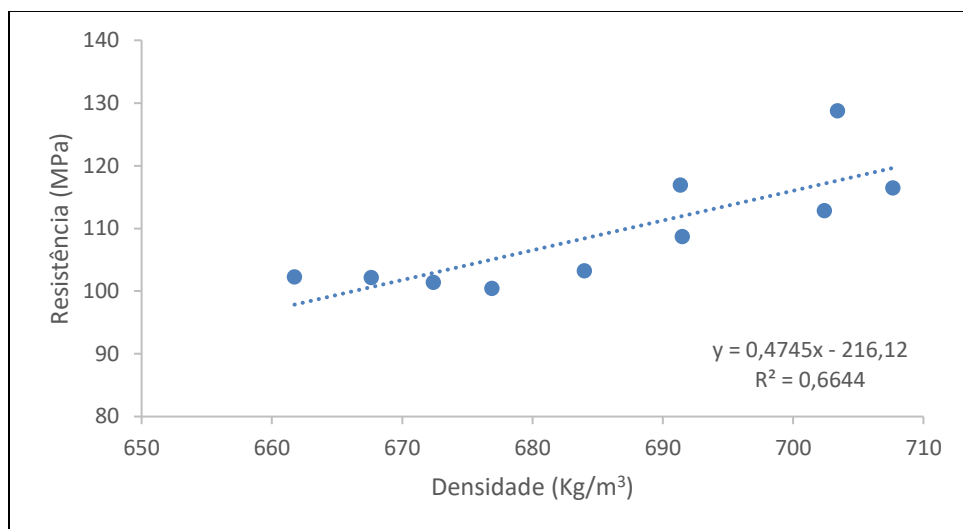


Figura H15. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras impregnadas com SM.

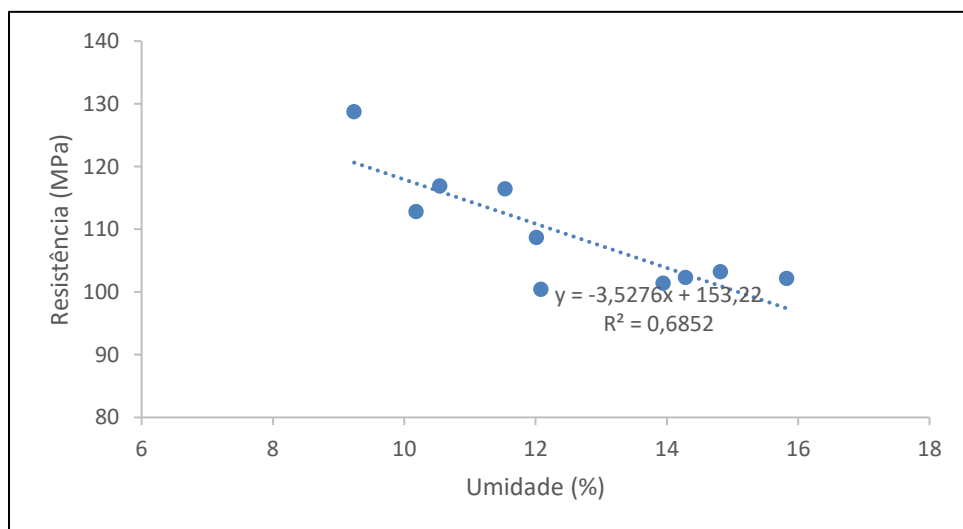


Figura H16. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM durante os ensaios a flexão.

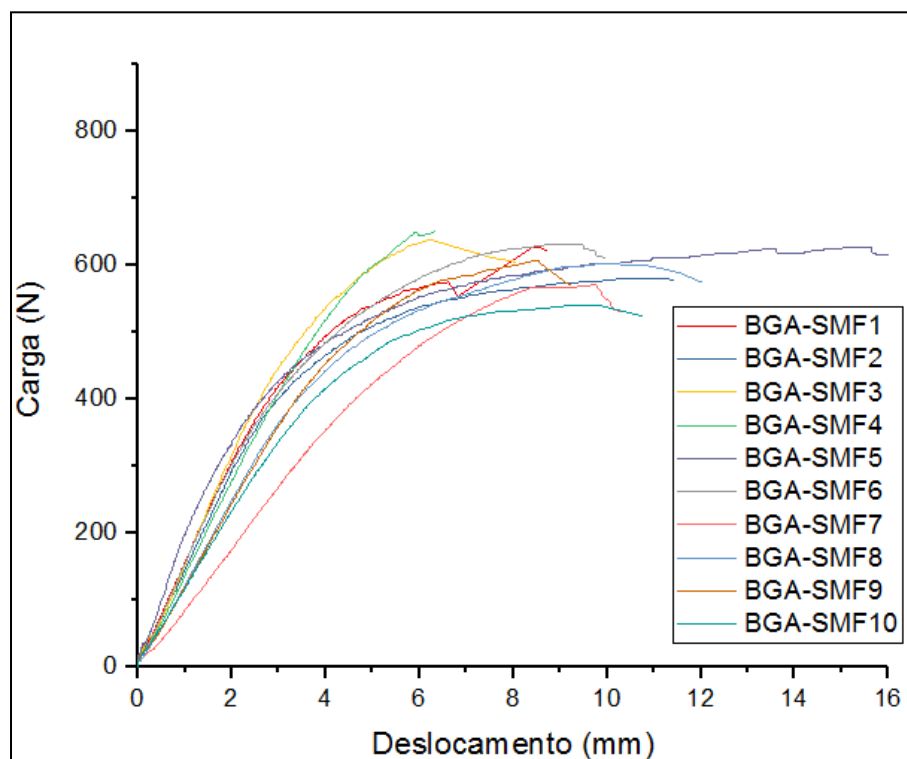


Tabela H6. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA e impregnadas com SM.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGA-SMF1	111,17	83,38	11,78	625	12,00
BGA-SMF2	113,12	84,84	11,38	638	10,94
BGA-SMF3	119,49	89,62	11,42	619	9,51
BGA-SMF4	120,73	90,55	11,30	653	10,58
BGA-SMF5	123,92	92,94	9,57	633	8,69
BGA-SMF6	128,51	96,38	10,69	689	9,94
BGA-SMF7	118,55	88,91	8,50	641	11,21
BGA-SMF8	115,43	86,57	9,25	617	11,05
BGA-SMF9	122,77	92,08	10,65	660	11,26
BGA-SMF10	113,55	85,16	10,49	636	10,97
Média	118,73	89,04	10,50	641,2	10,62
σ	5,48	4,11	1,07	21,7	0,97
C.V.	4,61	4,61	10,22	3,4	9,13

Figura H17. Resistência a flexão em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM.

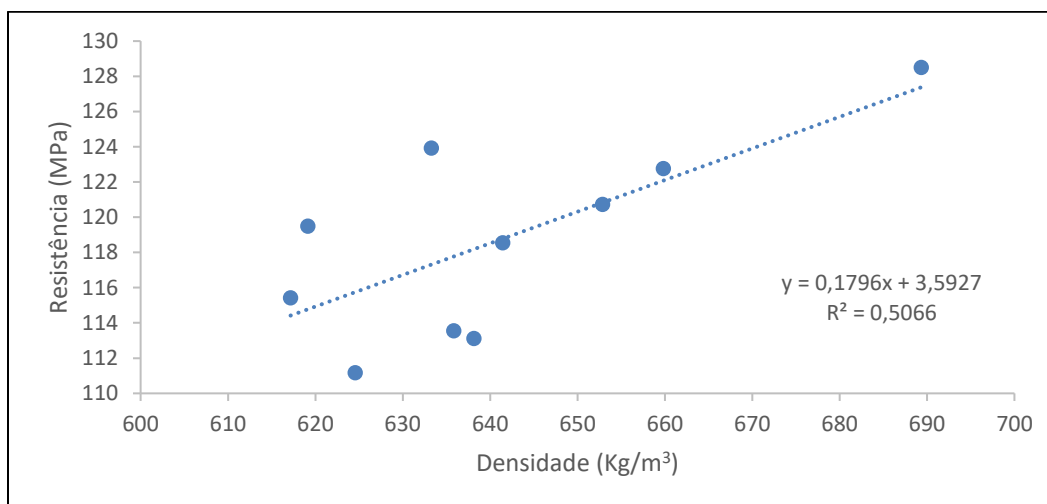


Figura H18. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SM.

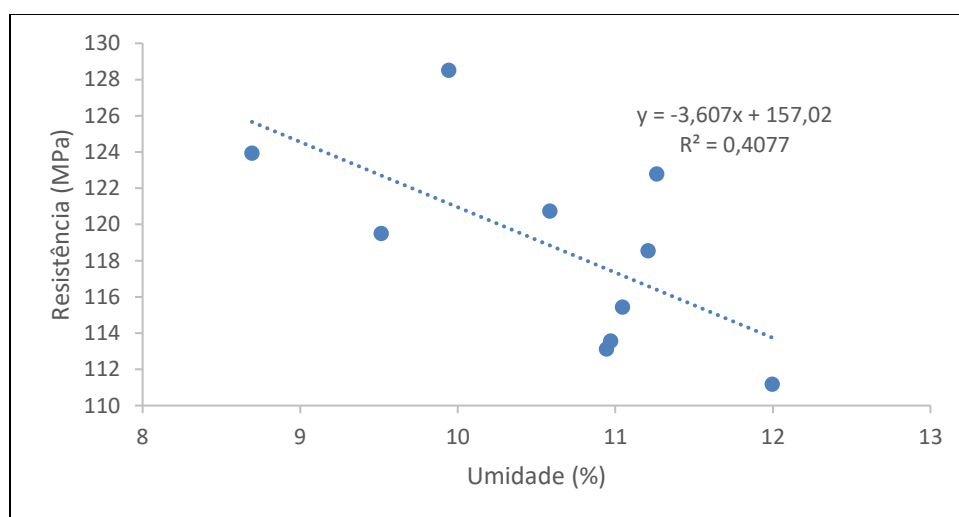


Figura H19. Gráficos Resistência-Deformação das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB durante os ensaios a flexão.

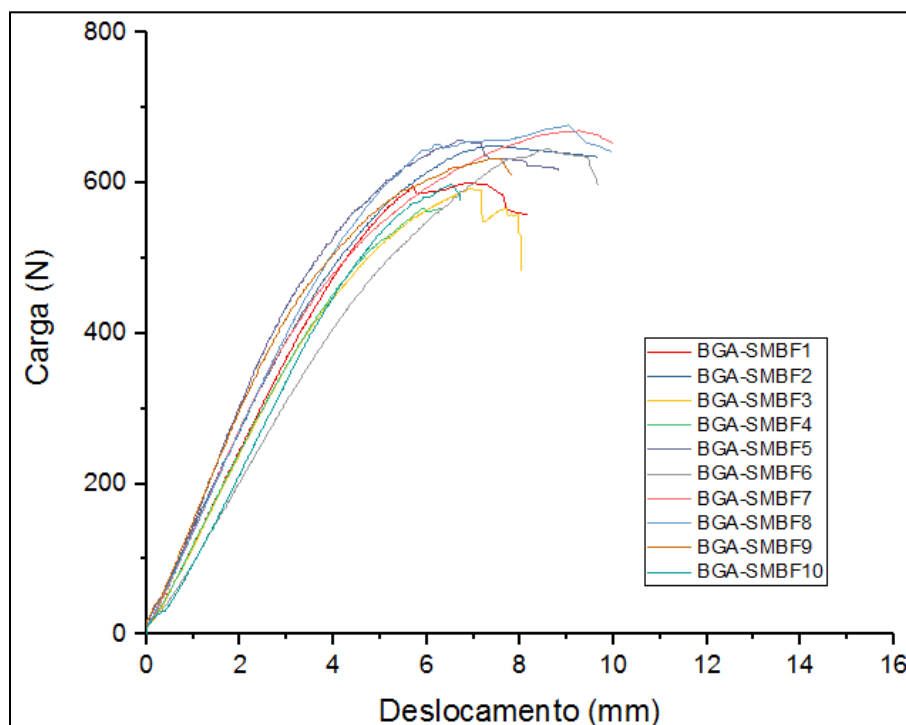


Tabela H7. Parâmetros de resistência a flexão encontrados para os corpos de prova infiltrados com solução GA e impregnadas com SMB.

Rotulo	Resistência máxima	Limite de elasticidade	Módulo de elasticidade	Densidade	Conteúdo de umidade
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(Kg/m ³)	(%)
BGA-SMBF1	123,25	92,43	11,40	679	11,10
BGA-SMBF2	122,50	91,88	9,46	643	12,12
BGA-SMBF3	114,86	86,14	9,54	645	14,69
BGA-SMBF4	114,68	86,01	10,94	647	12,50
BGA-SMBF5	126,33	94,74	11,65	663	11,74
BGA-SMBF6	128,95	96,71	9,35	662	10,92
BGA-SMBF7	128,04	96,03	9,47	669	8,06
BGA-SMBF8	133,47	100,10	11,34	688	9,96
BGA-SMBF9	126,00	94,50	11,67	660	13,42
BGA-SMBF10	113,58	85,19	10,12	657	12,74
Média	123,17	92,37	10,49	661,2	11,72
σ	6,79	5,09	1,00	14,4	1,86
C.V.	5,51	5,51	9,50	2,2	15,83

Figura H20. Resistência a flexão em função da densidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB.

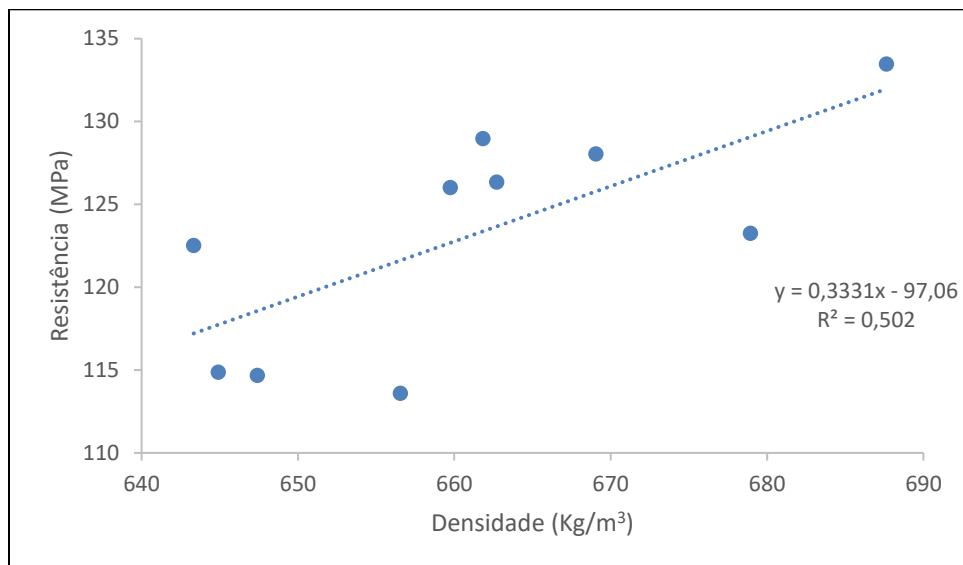
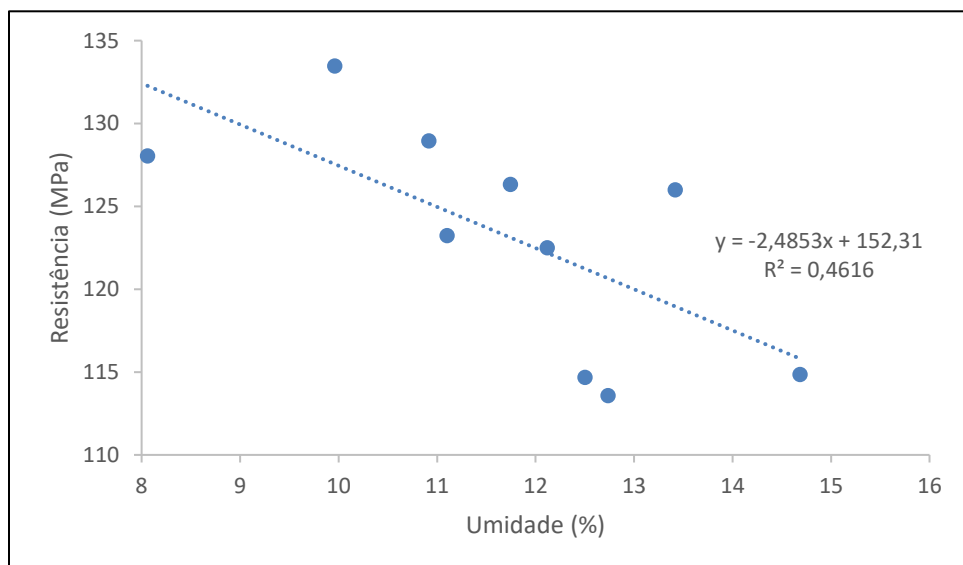


Figura H21. Resistência a flexão em função do conteúdo de umidade das amostras infiltradas com solução GA e impregnadas com SMB.



Anexo I. Absorção de água e variação dimensional

A seguir se apresentam os gráficos que relacionam a variação da massa (m), espessura (h), largura (b), comprimento (L) e volume (v) dos diferentes grupos de amostras prismáticas de proporção 1:1:15 espessura:largura:comprimento; após de se manter 30 mergulhadas na água.

Figura I1. Gráficos da porcentagem de absorção de água em função ao tempo

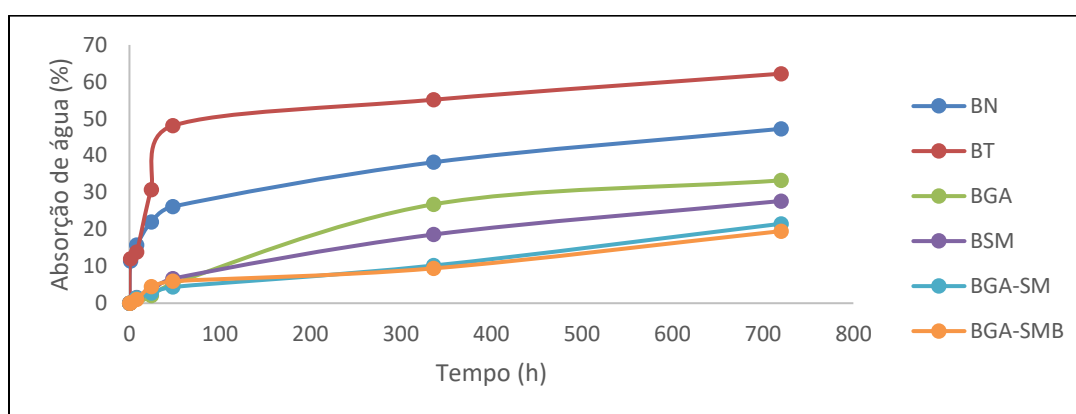


Figura I2. Gráficos da variação da largura em função ao tempo

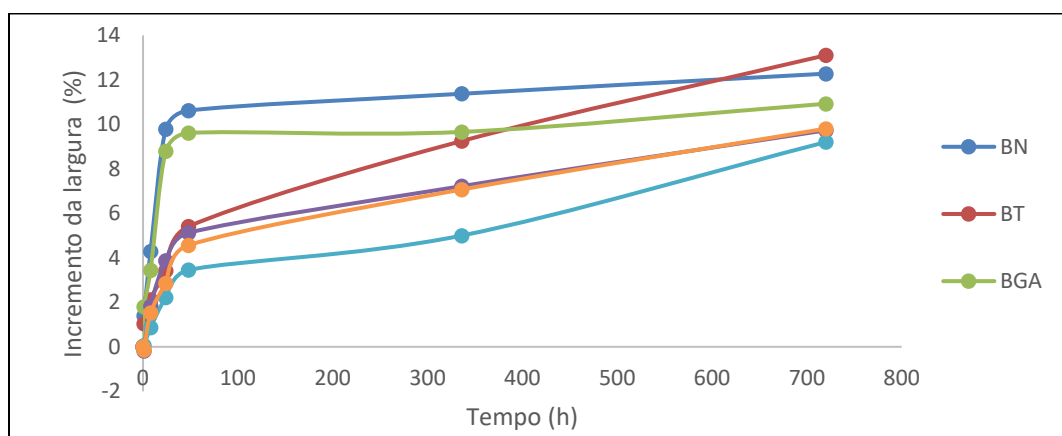


Tabela I1. Variação porcentual da largura (b) nos corpos de prova a diferentes tempos de imersão em relação as amostras em sua condição natural

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BN-AA-t	-25,79	-50,56	-65,00	-49,07	-18,68	6,73
BN-AA-t	28,83	-19,89	-10,17	-9,51	-15,08	-11,02
BT-AA-t	-112,77	-57,35	-60,41	-51,74	-36,51	-20,74
BGA-AA-t	-95,39	-79,95	-77,39	-67,49	-56,05	-25,05
BSM-AA-t	-109,83	-64,56	-70,81	-56,97	-37,83	-20,14

Fonte: Própria- , **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **t**: Face tangencial

Figura I3. Gráficos da variação da largura em função ao tempo

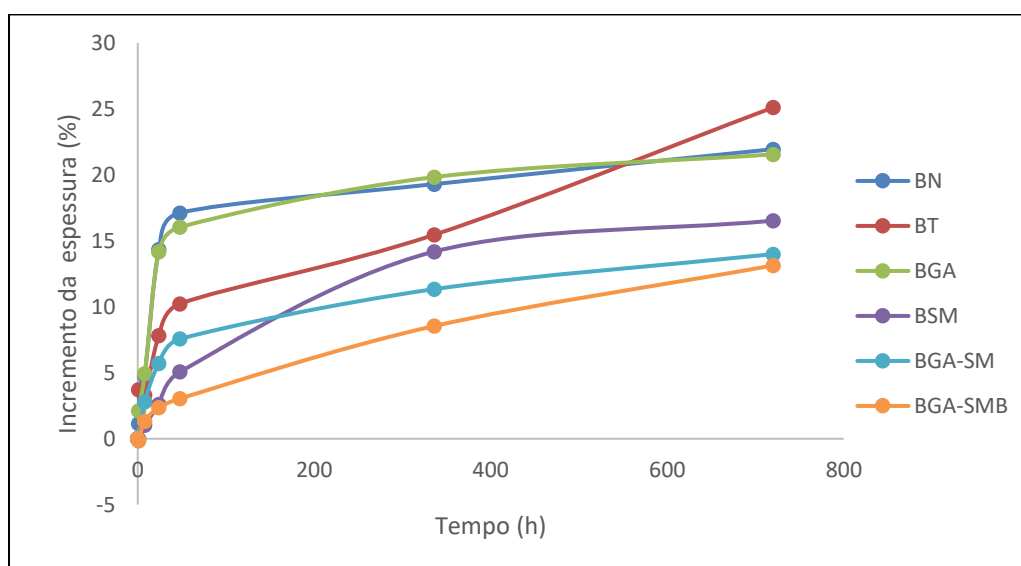


Tabela I2 Variação porcentual da expansão da espessura (h) das amostras em diferentes tempos de imersão, em relação as amostras em sua condição natural

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BN-AA-h	223,99	-30,41	-45,50	-40,23	-19,89	14,41
BT-AA-h	84,66	3,84	-1,03	-6,29	2,77	-1,80
BGA-AA-h	-98,18	-78,44	-81,85	-70,37	-26,49	-24,68
BSM-AA-h	-112,06	-41,25	-60,11	-55,79	-41,24	-36,24
BGA-SM-AA-h	-111,71	-72,00	-83,44	-82,18	-55,72	-40,15

Fonte: Própria- , **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **h**: Face radial

Figura I4. Gráficos da variação do comprimento em função ao tempo

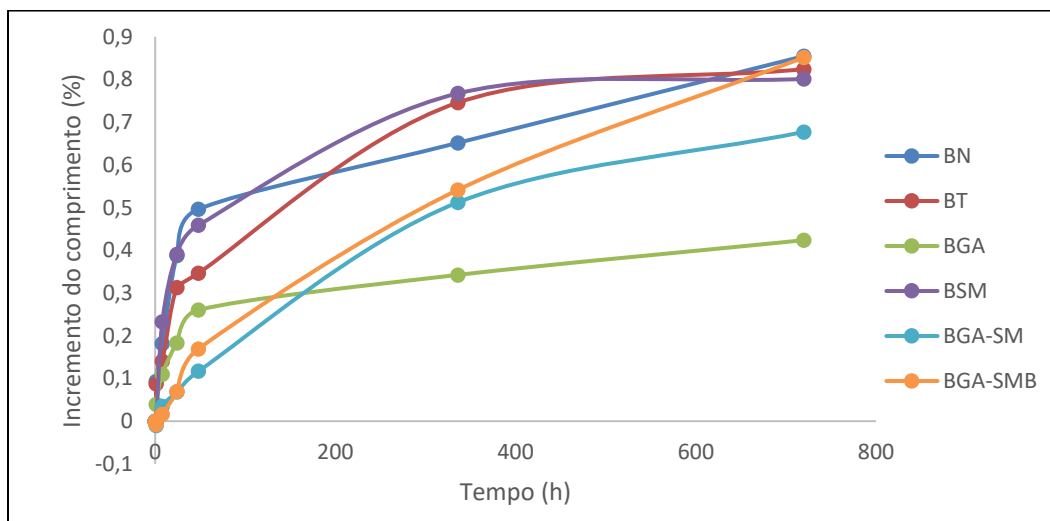


Tabela I3. Variação porcentual do comprimento (L) das amostras em diferentes tempos de imersão em relação as amostras em sua condição natural

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BT-AA-L	-6,61	-22,91	-19,34	-30,16	14,45	-3,56
BGA-AA-L	-57,32	-39,63	-52,77	-47,51	-47,44	-50,42
BSM-AA-L	-103,13	27,98	0,88	-7,55	17,75	-6,25
BGA-SM-AA-L	-110,25	-80,59	-82,32	-76,40	-21,39	-20,76
BGA-SMB-AA-L	-107,88	-91,11	-82,14	-65,86	-16,91	-0,36

Fonte: Própria- , **B:**Bambu; **GA:** Glutaraldeído; **SM:**Copolímero, **SMB:**Terpolímero; **AA:**absorção de água; **L:** comprimento

Figura I4. Gráficos da variação do volume em função ao tempo

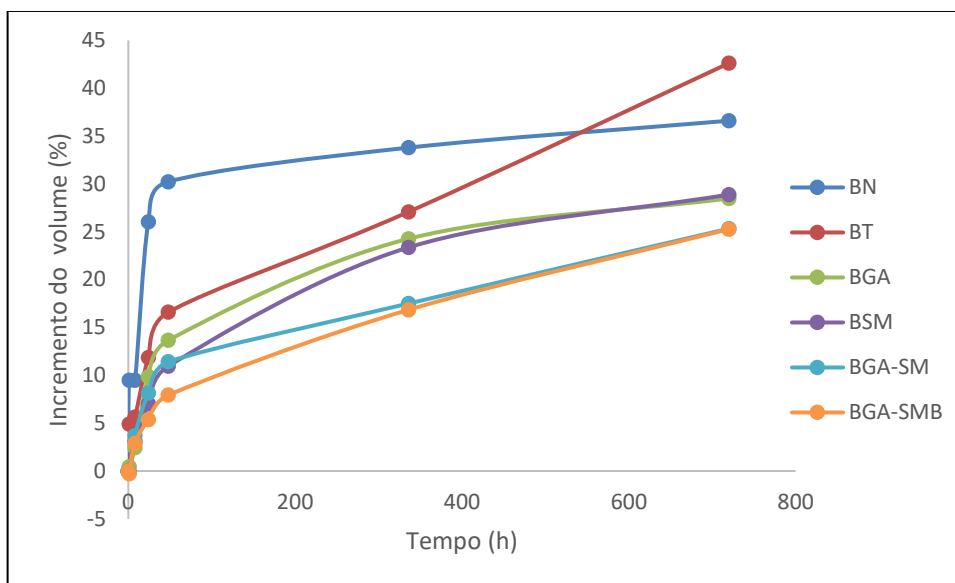


Tabela I4. Variação porcentual do volume (V) das amostras em diferentes tempos de imersão em relação as amostras em sua condição natural

Amostra	Tempo (h)					
	1	8	24	48	336	720
BT-AA-v	-48,42	-40,44	-54,49	-45,09	-19,86	16,43
BGA-AA-v	-95,11	-74,26	-62,15	-54,79	-28,18	-22,18
BSM-AA-v	-101,69	-67,15	-73,14	-63,72	-30,85	-21,07
BGA-SM-AA-v	-100,87	-60,86	-68,78	-62,27	-48,21	-30,80
BGA-SMB-AA-v	-103,01	-69,56	-79,37	-73,74	-50,15	-30,97

Fonte: Própria- , **B**:Bambu; **GA**: Glutaraldeído; **SM**:Copolímero, **SMB**:Terpolímero;**AA**:absorção de água; **v**: volume