

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE MECÂNICA DE BIOCOMPÓSITO DE MATRIZ FÚNGICA REFORÇADO COM SUBSTRATO VEGETAL *

Iris Sterfanie Santos¹
Eliana Midori Sussuchi²
Maxwell Paca Matos³
Regina Helena Marino⁴
Sandro Griza⁵

Resumo

As preocupações recorrentes com o ambiente e as gerações futuras estão norteando a tecnologia e a ciência a buscar medidas sustentáveis, a fim de garantir o equilíbrio entre sociedade-economia-natureza. A utilização do micélio como uma alternativa para substituição de polímeros sintéticos está em ascensão na indústria da biotecnologia. O biocompósito foi formado por uma matriz fúngica de podridão branca (*P. sanguineus*) e substrato vegetal (pó de coco e farelo de trigo), inoculados durante 13 dias e submetido a temperatura de 50, 60 e 70°C durante secagem a 48 horas. Os resultados apontam redução da resistência a compressão, da densidade e da perda de massa e do volume com o aumento da temperatura. Assim, um biocompósito com propriedades competitivas e similares a espumas é possível de ser desenvolvido, com atenção voltada a ligação da rede micelial ao substrato e ao comportamento da película micelial formada na fase de inoculação.

Palavras-chave: Biocompósito; Micélio; Material lignocelulósico.

CHARACTERIZATION AND MECHANICAL ANALYSIS OF BIOFUELS OF FUNGIC MATRIX REINFORCED WITH PLANT SUBSTRATE

Abstract

Recurring concerns about the environment and future generations are driving technology and science to seek sustainable measures, ensuring a balance between society-economy and nature. The use of the mycelium as an alternative for polymer replacement is on the rise in the biotechnology industry. The biocomposite was composed of a fungal matrix of white rot (*P. sanguineus*) and vegetable substrate (coconut powder and wheat bran), inoculated for 13 days and submitted to a temperature of 50, 60 and 70°C during drying at 48 hours. The results indicate reduction of the compressive strength, density and loss of mass and volume with the increase of temperature. A biocomposite with competitive and foam-like properties is possible to be developed, paying attention to the connection of the mycelial network to the substrate and to the behavior of the mycelial film formed in the inoculation phase.

Keywords: Biocomposite; Mycelium; Lignocellulosic material.

¹ Engenheira Civil, Mestranda em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

² Química, Dr.^a em Química, Professora Associada II, Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

³ Engenharia Agrônoma, Graduando em engenharia agrônoma, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

⁴ Engenheira Agrônoma, Dr.^a em Biotecnologia, Professora Assistente II, Departamento de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico, Dr. em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Professor Associado, Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o consumo de materiais poliméricos sintéticos aumentou significativamente. Neste contexto, na década de 50 foram produzidos 1,5 milhões de toneladas e em 2013 passou para 299 milhões de toneladas [1], que quando descartado de forma irregular acarreta em dano ao ambiente. Uma vez que, o poliestireno expandido necessita de mais de 100 anos para ser decomposto na natureza, por ser insolúvel e não apresentar nutrientes para os micro-organismos saprófitas.

De forma alternativa, pesquisas com a inserção de sistemas biológicos vivos com o intuito de criar novos materiais sustentáveis, vêm sendo desenvolvidas mundialmente [2], visando a substituição dos materiais poliméricos sintéticos obtidos a partir de recursos não renováveis. Esses materiais alternativos podem ser oriundos de fontes naturais como plantas ou micro-organismos, além de serem sustentáveis, biocompatíveis e biodegradáveis [2] e apresentam propriedades similares ao poliestireno expandido de acordo com a aplicação final.

Os fungos são exemplos de fontes naturais e alternativas para utilização e substituição de alguns materiais poliméricos sintéticos. Estes micro-organismos são conhecidos popularmente como mofo ou patógenos de plantas, alimentos e animais. Contudo, existem inúmeros benefícios que os fungos podem proporcionar a sociedade que vão desde a fermentação de alimentos, contribuição para indústria de combustível, medicina, farmacologia até a produção de novos materiais [3, 4, 5].

A parte do fungo que despertou interesse da ciência nos últimos anos para estudos biotecnológicos foi o conjunto de hifas denominado micélio. As hifas (unidade celular fúngica) são separadas por uma parede transversal porosa denominada septo, a qual confere proteção e fornece resistência mecânica ao corpo do micélio [2]. O crescimento das hifas é apical e em meio nutritivo adequado, o micélio coloniza o substrato por meio de pressão física e através da secreção enzimática promove a decomposição de polímeros naturais, transformando-os em nutrientes que são facilmente absorvidos e transportados [2] [4].

O micélio é tido como potencial para uso biopolimérico e biocompósito devido suas características e propriedade químicas e físicas, pois acelera a decomposição de materiais lignocelulósicos e é capaz de agregar as fibras vegetais, funcionando como um aglutinante natural. Dentre os fungos de importância biotecnológica, os fungos de podridão branca se destacam por serem eficientes degradadores da lignina, o que resulta na coloração final esbranquiçada da madeira [6].

O *Pycnoporus sanguineus* é um tipo de fungo de podridão branca, cujo basidioma é de coloração vermelho alaranjado quando jovem e durante a senescência apresenta a cor laranja como cor dominante [7]. No processo de deslignificação enzimática são produzidas metaloenzimas envolvidas na transformação de compostos aromáticos e enzima lacases na oxidação de compostos fenólicos [8] [9], o que permite o cultivo deste micro-organismos em diversos substratos lignocelulósicos, incluindo diferentes resíduos agroindustriais.

O pó de coco é um exemplo de material lignocelulístico residual da indústria do coco, principalmente na região Nordeste do Brasil. Este resíduo é constituído basicamente de fibras, que são subaproveitadas na fabricação de vasos e de composto orgânico [10]. O pó do coco, subproduto da extração das fibras, é um material biodegradável, leve, renovável e similar as melhores turfas encontradas na

Europa e América do Norte [11], sendo composta basicamente por lignina, hemicelulose e celulose [12] [13].

O micélio é composto por polímeros naturais como a quitina, β -glucanas e proteínas [2] [4], os quais conferem propriedades mecânicas e térmicas similares ao poliestireno expandido e com características possíveis de ser ajustadas de acordo com o substrato de cultivo, por exemplo. A β -glucana, abundante na superfície externa da parede celular da hifa, serve como mucilagem, ou seja, confere retenção de água e aumento de volume. Já a quitina e outros polissacarídeos, presente nas microfibras da camada interna da parede celular fúngica, fornece a hifa rigidez mecânica e resistência [4] [14].

Haneef *et al* [2] observaram que o cultivo dos fungos *Pleurotus ostreatus* e *Ganoderma lucidum* em meio de cultura à base de celulose resultou em biocompósito mais rígido com módulo de Young mais elevado, provavelmente devido a formação de hifas com filamentos mais espessos e com ramificações no crescimento periférico, quando comparado ao emprego do meio de batata-dextrose-celulose (BDC), que apresentou comportamento mecânico dúctil. No entanto, estes autores verificaram que não houve influência do meio de cultivo dos isolados fúngicos no crescimento micelial.

De acordo com as propriedades mecânicas, Islam *et al* [4] observaram que o biocompósito fúngico apresentou resposta linear elástica a pequenas deformações. E em relação à densidade do material, esta influenciou no módulo de elasticidade variando-o de 600 a 2000 kPa, a tensão de escoamento de 40-80 kPa e a tensão máxima de 100 a 300 kPa. Além disso, a comparação das propriedades mecânicas do micélio com outros materiais tradicionais pelo mapa de Ashby, o compósito fúngico pode ser associado a uma espuma.

Na aplicação técnica do biomaterial, Román-Ramos *et al* [14] avaliaram a utilização do micélio como substituto do EPS e verificaram que para a resistência a compressão simples a uma deformação de 10% a resistência do biocompósito foi superior ao EPS, condicionando seu uso em diferentes setores da construção civil como forma descartável para concretagem ou material isolante, assim como uso para embalagens. Young *et al* [15] também o pontuaram como potencial substituto do EPS ao comparar as propriedades do biocompósito com uma espuma amplamente utilizada na construção civil como isolante; suas propriedades superam em termos de resistência a compressão e condutividade térmica, porém a densidade do biopolímero ainda foi consideravelmente maior, cabendo maiores análises para melhorar a propriedade.

Islam *et al* [5] acrescentaram aos estudos a relação resíduo agrícola e micélio, cujo objetivo da análise era verificar o comportamento da matriz fúngica como ligante das partículas de reforço (resíduo) dentro de sua rede filamentosa. Para os testes houve variação do tamanho da partícula dos resíduos, porém não se observou que o tamanho dela influenciou nas respostas mecânicas. Neste sentido, os autores observaram que durante o carregamento inicial a uma dada deformação, a matriz micelial dominou as respostas mecânicas; ao passo que as tensões foram aumentando o substrato assumiu o papel de reforço, conferindo enrijecimento ao composto.

Como observado, a utilização da matéria prima lignocelulósica com micélio resulta em um composto biodegradável e com propriedades mecânicas competitivas com os materiais sintéticos. O conhecimento a respeito do biocompósito e como o tratamento térmico influencia em suas propriedades mecânicas é crucial, visto que, a partir de sua caracterização é possível estabelecer parâmetros para síntese e

processamento e conseqüentemente, determinar as propriedades que se deseja obter ao final do processo.

Desse modo, o presente estudo busca analisar as respostas físicas, mecânicas e químicas de um biocompósito de matriz micelial reforçado com substrato vegetal submetendo-o a diferentes tratamentos térmicos durante um período de 48 horas após a completa colonização do substrato de cultivo do fungo *P. sanguineus*, apresentando-o como um possível material substitutivo ou alternativo aos produtos poliméricos sintéticos existentes, mas com a preservação de características biodegradáveis.

2 DESENVOLVIMENTO

O isolado escolhido para análise foi o *Pycnoporus-sanguineus*, cultivado inicialmente em meio à base de batata-dextrose-ágar (BDA) e posteriormente em pó de coco suplementado com 30% de farelo de trigo, ambos com partículas inferiores a 1 mm, em mistura umedecida com água destilada, com 18 repetições. A produção do biocompósito seguiu a metodologia da patente “Bioprodução de embalagens com uso de micélio de fungos comestíveis” registrada no Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI. Após a completa colonização do substrato de cultivo, as amostras foram submetidas ao tratamento térmico em estufa com circulação e renovação de ar a temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C durante 48 horas. Para tanto, selecionou-se ao acaso seis amostras para cada temperatura de secagem.

As variáveis analisadas foram: microestrutura do substrato colonizado; densidade aparente; perda da massa e de volume do biocompósito; resistência à compressão máxima e análise química do substrato colonizado.

A microestrutura foi analisada através da microscopia eletrônica de varredura. A densidade aparente das amostras foi calculada a partir do peso e volume do material após a secagem de acordo com a ASTM C303/2016. A perda de massa e volume, por sua vez, foram aferidas com 24 e 48 horas e 70 dias após a secagem a partir da equação: perda (%) = $[(U - S) / S] \times 100\%$, onde U representa a massa/volume da amostra úmida, obtida antes da secagem, e S a massa/volume após a secagem.

A análise de resistência a compressão foi realizada na máquina universal Instron modelo 3367 de acordo com a norma ASTM 1621/2016, com taxa de deslocamento de 4 mm/min e interrupção do ensaio após formação de fissuras na superfície dos corpos de prova.

Com relação a análise química, a espectroscopia de infravermelho com transformadas de Fourier (FTIR) foi conduzida em um modelo Varian 640-IR a uma faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com formação de pastilha do biocompósito reduzido ao pó com o brometo de potássio (KBr) em parceria com o Laboratório de Corrosão e Nanotecnologia do Departamento de Química pertencente à Universidade Federal de Sergipe.

2.1 Resultados e discussão

O micélio ao decompor material vegetal lignocelulósico, utiliza os nutrientes como fonte de energia e de carbono para seu metabolismo por meio da secreção de enzimas oxidativas, como as lacases e promove a estabilidade do substrato [6]. Essa estabilidade é conferida após degradação da celulose, da hemicelulose e da lignina presentes nos resíduos lignocelulósicos utilizados como substratos de cultivo para fungos filamentosos. Deste modo, o micélio funciona como um aglutinante

entre as partículas de farelo de trigo e pó de coco, conferindo ao biomaterial forma estável [16].

Com relação ao crescimento das hifas no compósito, a microscopia eletrônica de varredura (Figura 1) mostrou um crescimento aleatório das hifas do *P. sanguineus* no substrato vegetal, as quais formam uma rede densa [a] na área onde o substrato foi totalmente degradado e crescimento disperso [b] nas áreas onde as partículas do substrato ainda estão sendo degradadas. A quebra do substrato (c) pelas hifas ocorre inicialmente na superfície da partícula e, por meio do seu crescimento apical [6] [16], as hifas penetram tanto no composto quanto nas partículas do pó de coco e farelo de trigo, que com o processo de degradação são formadas partículas menores durante o desenvolvimento micelial.

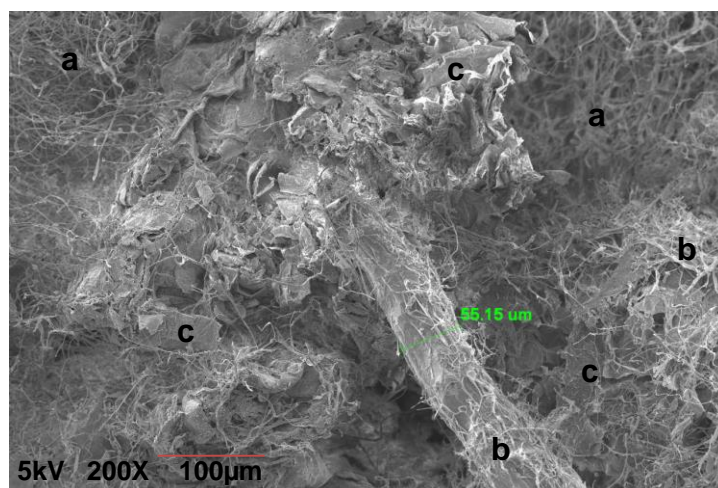


Figura 1. MEV em amostra com tratamento térmico a 70°C.

Descrição: rede micelial densa [a]; crescimento micelial aleatório no substrato [b]; degradação das partículas de substrato [c].

A inspeção visual, por sua vez, revelou as áreas totalmente degradadas com coloração esbranquiçada, bem como textura esponjosa, visto que o *P. sanguineus* é um fungo de podridão branca [7], capaz de degradar a lignina do substrato vegetal. Essas áreas, correspondente ao aglomerado de hifas, antes da secagem apresentaram-se mais espessas, com diâmetro inferior a 2 mm, mas com o processo de secagem ocorreu redução do diâmetro micelial com valores inferiores a 1 mm. Essa redução do diâmetro sob temperatura foi verificada [16], apesar da temperatura a qual os autores submeterem o material ser substancialmente maior que as temperaturas do presente estudo, a pirólise a 600°C resultou na redução substancial (10–30%) do diâmetro da hifa e também foi identificada redução de 66% na espessura da parede celular do *Trametes versicolor*.

No biocompósito com *P. sanguineus*, o crescimento aleatório das hifas preencheu toda área interna do compósito. Contudo, na superfície do material a presença das hifas é incidente, bem como nas camadas adjacentes, com redução na região central do biocompósito. Estudo [17] aponta que a região central do biocompósito tem menor colonização pelo fungo devido à redução de oxigênio, o que pode ser melhorado com fluxo de ar forçado através do substrato durante a colonização ou aumentando o tempo de colonização.

A colonização das hifas no substrato resulta na formação de uma rede micelial densa que pode impactar nas respostas mecânicas. As hifas podem ser responsáveis por proporcionar estabilidade ao substrato e garantir resistência mecânica, pois interagem aleatoriamente e formam uma estrutura de rede que

atua como uma cola natural, ligando os substratos e formando um material composto [16]. Como o crescimento do micélio no substrato é aleatório, ao encontrar o molde cilíndrico, seu crescimento é limitado na superfície, o micélio não será capaz de crescer aleatoriamente, mas verticalmente, ocorrendo a formação da película micelial. Este processo induz um padrão na estrutura interna ou anisotropia [15].

A camada micelial formada na superfície, chamada de película micelial [17], além da característica anisotrópica, confere estabilidade, resistência mecânica e propriedades térmicas e retardante de chama. O aumento significativo na densidade da hifa superficial e formação da película reduz a liberação de calor, atua como um isolante térmico e limita o fornecimento de gases e oxigênio combustíveis para a chama [16].

Com relação a perda de massa, antes do processo de secagem observou-se redução da massa das amostras de 263,20 g para 244,06g \pm 5,08g, resultando na perda de 7,27% após 13 dias de cultivo do isolado no substrato. Essa redução revela decomposição de parte do substrato vegetal pelo fungo e a formação de micélio com menor densidade que as partículas de substrato, ou seja, substituição de biomassa vegetal por biomassa fúngica, que é mais leve [18].

Alguns estudos também avaliaram redução de massa durante a colonização [19]. Segundo as pesquisas, houve perda de 0.3-3.3% quando inoculado com o *Pleurotus ostreatus* durante 30 dias e de 1.2 a 2.4% quando colonizado com o *Phanerochaete chrysosporium* [19], ambos inferiores a perda de massa quando comparado aos valores observados com o *P. sanguineus*, o que caracteriza um fungo eficiente na degradação do pó de coco e do farelo de trigo.

Além disso, o processo de secagem também interferiu na perda de massa e de volume das amostras colonizadas pelo *P. sanguineus*. Neste contexto, a perda de massa e de volume do compósito fúngico foi diretamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura maior a perda de massa e de volume (Figura 2).

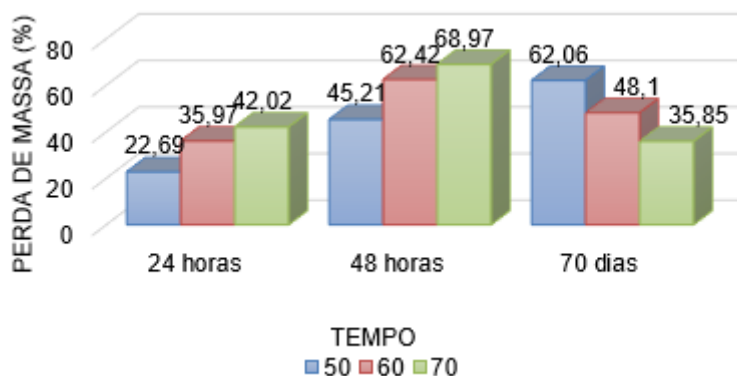


Figura 2. Perda de massa do compósito fúngico produzido a partir de pó de coco e farelo de trigo colonizados pelo fungo *P. sanguineus* submetidos ao tratamento térmico de 50, 60 e 70°C após 24 e 48 horas de secagem e 70 dias após a secagem

A perda expressiva de massa pode estar relacionada a evaporação da água no interior do material. Entretanto, a água não foi completamente evaporada durante o período de secagem visto que, à temperatura ambiente, o material continuou perdendo massa até atingir uma massa de equilíbrio de 48,27g \pm 0,96g aos 70 dias. Desse modo, do material original (263,20 g) tem-se de aproveitamento para o material final aproximadamente 20%, com perda de 80% de massa durante a

inoculação, secagem e quando exposto a temperatura ambiente. Porém não foi observado alteração em suas características estéticas.

A presença de água após o tratamento térmico pode ser explicada devido a temperatura utilizada ser inferior a necessária para evaporação por completo da água, bem como a capacidade que o pó de coco tem em reter água, onde seus principais constituintes como celulose, hemicelulose e lignina o tornam um absorvente natural [20] [21].

A perda de volume, por sua vez, foi menor que a perda de massa, revelando redução do volume de 15,77, 26,91 e 30,16% quando tratado termicamente com 50, 60 e 70°C, respectivamente. Essa perda de volume pode estar atrelada também a perda de umidade no material, bem como presença de poros devido à falta de acomodamento das partículas de reforço e, com a ação da temperatura, reduzem devido a retração do material, tornando-o mais compacto e leve.

A densidade é uma propriedade analisada quando se estuda biocompósitos miceliais [4] [14] [17], sobretudo com pretensões para substituição ou uso alternativo de materiais poliméricos sintéticos. Biocompósitos [17] apresentaram densidade de 0,10-0,17 g.cm⁻³ quando desenvolvidos a partir dos fungos *Trametes multicolor* e *Pleurotus ostreatus* cultivados em serragem de faia e palha de colza suplementadas com farelo de soja e em fibras de algodão, não prensados e secos em temperatura ambiente por 24-48 horas.

A densidade é controlada por condições ambientais e nutricionais [4], ou seja, a densidade do biocompósito é afetada variando por exemplo, substrato e condições de tratamento de secagem. De acordo com os resultados, observou-se que a densidade foi inversamente proporcional à temperatura de secagem, onde a 50°C a densidade do biocompósito foi de 0,290 ± 0,015 g.cm⁻³, a 60°C 0,240 ± 0,015 g.cm⁻³ e a 70°C 0,196 ± 0,012 g.cm⁻³. Os valores similares de densidade de compósitos fúngicos submetidos à baixa temperatura de secagem foi observado na literatura [15]. Os autores verificaram que ao submeter as amostras cultivadas em diferentes substratos com fungo de podridão branca por duas semanas com secagem a 60°C por 24h, a densidade foi de 0,265 g.cm⁻³.

Islam *et al* [4] observaram que o compósito fúngico em palha de milho com nutrição especial, submetido à secagem a 100°C por 4 horas, apresentou densidade de 0,122 g.cm⁻³. Assim, os resultados apontam que a temperatura pode ser um fator determinante para a densidade do compósito fúngico, em que temperatura elevadas reduz a densidade do material. Essa condição pode estar atrelada ao acomodamento das partículas e sua ligação a rede micelial, com redução de umidade e de poros.

Segundo Islam *et al* [4] a resistência está ligada a densidade do material que, de acordo com seus ensaios, quanto maior a densidade (0,03-0,05 g.cm⁻³), maior foi a resistência à compressão (40-80 kPa). No compósito de *P. sanguineus* tem-se que a resistência à compressão, na secagem a 48 horas, pode estar condicionado a densidade, visto que a resistência à compressão reduziu à medida que a densidade diminuiu, cujo valores foram: 197,11 ± 59,27 kPa para 50°C, 198,95 ± 23,36 kPa e 148,39 ± 26,01 kPa para 60 e 70°C, respectivamente (Figura 3).

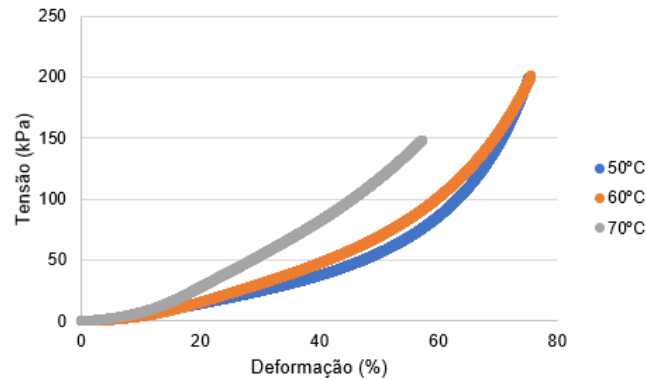


Figura 3. Tensão versus deformação do composto de *P. sanguineus* cultivado em pó de coco suplementado com farelo de trigo e submetido ao tratamento térmico de 50, 60 e 70°C após 48 horas após e completa colonização

Desse modo, pode-se inferir que o tratamento térmico influencia diretamente na densidade do biocompósito e que, por sua vez, impacta nos valores de resistência à compressão. Entretanto, o aumento da temperatura pode interferir no enrijecimento da rede substrato-micélio e resultar em um decréscimo da resistência mecânica do compósito, bem como na capacidade do material deformar.

A deformação máxima foi influenciada pela temperatura de secagem dos compósitos fúngicos, onde, quanto maior a temperatura, menor a deformação. A 50°C o material deformou $75,47 \pm 0,33\%$ sem apresentar fissura na superfície; a 60°C o ensaio foi interrompido por apresentar fissuração a $72,71 \pm 4,45\%$ e a 70°C a deformação foi de $52,97 \pm 9,53\%$ (Figura 4). Assim como em Yang *et al* [15], observou-se que o aparecimento das fissuras nos compósitos avaliados dependeu do substrato de cultivo e do abaulamento central do material. Além disso, o aumento da temperatura de secagem de 50-60°C para 70°C resultou em uma transição de comportamento de elástico para plástico.

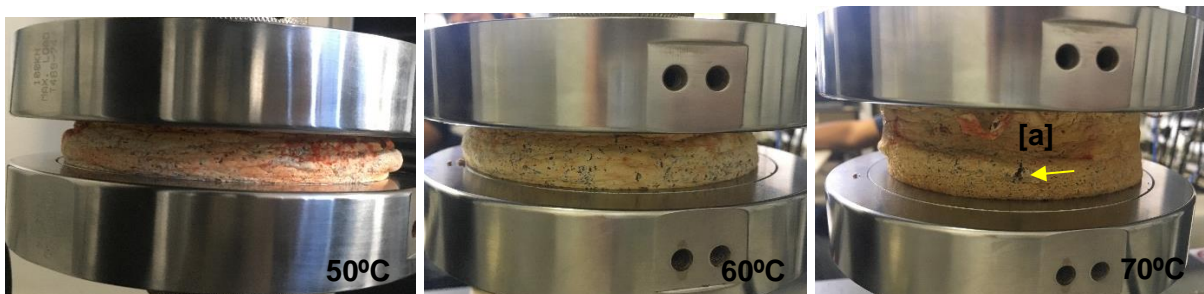


Figura 4. Deformação mecânica do composto de *P. sanguineus* cultivado em pó de coco suplementado com farelo de trigo e submetido ao tratamento térmico de 50, 60 e 70°C após 48 horas após e completa colonização

Descrição: fissura na película micelial a 70°C de tratamento térmico [a].

Com 50 e 60°C, o biocompósito assume um comportamento elástico, com absorção de cargas e recuperação de sua forma original. A 70°C de secagem, observa-se comportamento plástico, com maior deformação permanente, e conseqüentemente redução da resistência a compressão e deformação. O substrato desempenha um papel notório na estrutura geral do biocompósito, em associação com a rede micelial, porque aumenta a rigidez elástica, altera o modo de falha para abaulamento e previne ou reduz a ocorrência de fissuras na superficiais [15].

A película micelial formada na superfície do biocompósito se mostrou correlata não apenas com a deformação, mas também com a tenacidade do material, estimada através área abaixo da curva de compressão. As amostras secas a 50 e 60°C, onde

não houveram fissura na superfície, mostraram maior capacidade do material absorver carga até a ruptura e comportamento menos tenaz quando a fissura surgia a 70°C. O biocompósito apresentou a 50°C e 60°C tenacidade de 17,89 J e 17,66 J, respectivamente, e 12,24 J com 70°C. Como esperado, a menor deformação e resistência a compressão revelou menor tenacidade e conseqüente aparecimento de fissura na superfície.

A relação aumento de tenacidade, resistência e deformação a 50 e 60°C e a influência da película micelial podem estar atreladas ao comportamento da rede micelial. De acordo com Appels *et al* [18], a película fúngica por ser mais elástica do que o substrato colonizado, rompe com tensão maior quando comparado com a parcela do substrato. Contudo, à medida que a temperatura aumenta a rede micelial é fragilizada em virtude da cristalização dos açúcares presentes na bioquímica do micélio e as respostas mecânicas são absorvidas pelas partículas de reforço.

Então, a 70°C, as partículas de substrato – mais rígidas que a rede micelial – assumem a resposta mecânica, ocasionando na redução da deformação e aparecimento da fissura na superfície. Desse modo, a temperaturas baixas a rede micelial absorve as tensões e deformações, ou seja, controla as respostas mecânica e as partículas de reforço formada pelo substrato assumem um papel secundário de absorção de esforços, impedindo o colapso da rede e a fratura na superfície [5].

A caracterização microestrutural através do ensaio de FTIR revelou mesmo comportamento entre as temperaturas (Figura 5). As bandas são convergentes, apresentando diferenças nas intensidades das bandas em aproximadamente 3450 cm^{-1} , referente ao estiramento O-H, inferindo incidência de água em maior proporção na amostra tratada a 50°C, bem como de polissacarídeos [2].

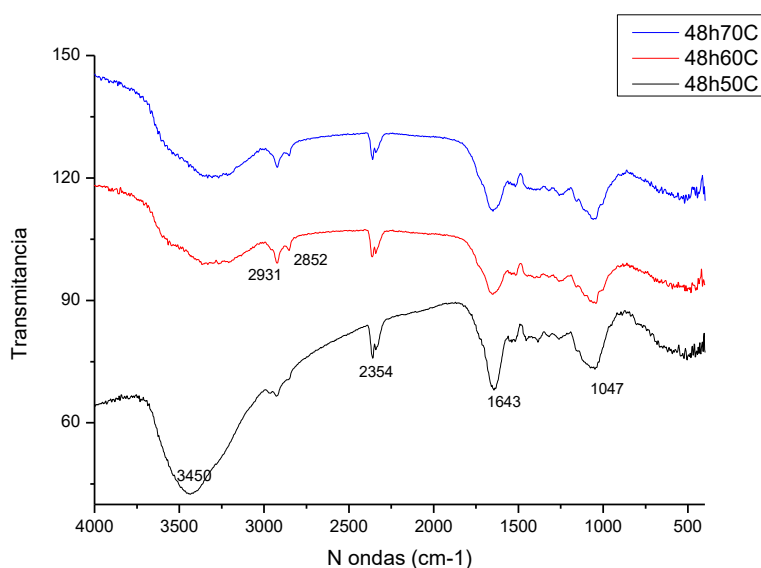


Figura 5. Espectros de FTIR de biocompósito submetido ao tratamento térmico de 50, 60 e 70°C após 48 horas após e completa colonização.

A lignina alcalina tem o mínimo de ligações O-H, com uma banda em 3450 cm^{-1} [20]. Duas bandas são visualizadas em 2931 e 2858 cm^{-1} com baixa intensidade, referente a vibração C-H, revelando presença de OCH_3 , um dos grupos de ligações presente na lignina [20], bem como alongamento simétrico e assimétrico CH_2 justificado pela presença de lipídeos [2] característicos da solução em BDA [2]. A banda em torno de 1644 cm^{-1} revela uma região de estiramento de ligações duplas de vibração C=O, bem como presença de grupos éster carbonílicos conjugados ou

acetil [20], característicos da lignina e presença de amida I característico de proteínas [2].

Bandas com baixa intensidade entre 1650-1050 cm^{-1} de lignina alcalina, podem indicar também a presença de pequenas quantidades da estrutura cristalizada da celulose I. As vibrações C=C do anel aromático em 1047 cm^{-1} corresponde as estruturas de fenil-propano da lignina [20] e estiramento C-C característicos de polissacarídeos [2].

3 CONCLUSÃO

A temperatura foi um fator decisivo no comportamento mecânico do biocompósito produzido a partir do micélio de *P. sanguineus*. Ao conservar o tipo de substrato e fungo, pode-se perceber que ao aumentar a temperatura de secagem as propriedades químicas e consequentemente físicas também foram alteradas, modificando a ligação do substrato com a rede micelial, reduzindo sua resistência, densidade e tenacidade. A película micelial formada na superfície também pode ter um papel fundamental com relação a resistência e deformação. Com o aumento da temperatura a película apresentou-se frágil e houve redução da deformação do biocompósito com aparecimento de fissuras na superfície. Porém estudos adicionais precisam ser realizados para atestar a eficiência da película quando tracionada, já que os esforços sob a rede micelial interna unida aos substratos são compressivos e a película micelial sofre esforço de tração.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPITEC-SE pelo apoio financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Li WC, Tse HF, Fok L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of The Total Environment*. 2016; 566–567.
- 2 Haneef M, Ceseracciu L; Canale C, Bayer IS, Heredia-Guerrero JA, Athanassiou A. Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*. 2017; 7:1-11.
- 3 Abreu JAS, Rovida AFS, Pamphile JA. Fungos de interesse: aplicações biotecnológicas. *Revista Uningá Review*. 2015; 21(1): 55-59.
- 4 Islam MR, Tudryn G, Bucinell R, Schadler L, Picu RC. Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Scientific Reports*. 2017; 7:1-12.
- 5 Islam MR, Tudryn G, Bucinell R, Schadler L, Picu RC. Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites. *Journal of Materials Science*. 2018; 53:1-12.
- 6 Esposito E, Azevedo JLD. Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia. 2ª ed. Caixias do Sul: EducS, 2010.
- 7 Téllez-Téllez M, Villegas E, Rodríguez A, Acosta-Urdapilleta ML, O'Donovan A, Díaz-Godínez G. Mycosphere Essay 11: Fungi of Pycnoporus: morphological and molecular identification, worldwide distribution and biotechnological potential. *Mycosphere*. 2016.
- 8 Guo H, Wang, XD, Lee DJ. Proteomic researches for lignocellulose-degrading enzymes: A mini-review. *Bioresource Technology*. 2018; 265:532-541.
- 9 Lomascolo A, Uzan-Boukhris E, Herpoël-Gimbert I, Sigoillot JC, Lesage-Meessen L. Peculiarities of Pycnoporus species for applications in biotechnology. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2011; 92:129–1149.

- 10 Rosa MF, Souza Filho MSM, Figueiredo MCB, Morais JPS, Santaella ST, Leitão RC. Valorização de resíduos da agroindústria. II Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais. 2011; p. 98-105.
- 11 Mattos ALA, Rosa MF, Crisóstomo LA, Bezerra FC, Correia D, Veras LGC. Beneficiamento da casca de coco verde. EMBRAPA – Agroindústria Tropical. [acesso em 26 mar. 2019]; 1-38. Disponível em: http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf.
- 12 Liyanage CD, Pieris M. A physico-chemical analysis of coconut shell powder. Procedia Chemistry. 2015; 16:222-228.
- 13 Lertwattanaruk P, Suntijitto A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. Construction and Building Materials. 2015; 94:664-669.
- 14 Román-Ramos JD, Luna-Molina FJ, Bailón-Pérez LJ. Fôrma perdida constituída por palha coesiva com micélio como substituto do poliestireno expandido. Informes de la Construcción. 2014; 66:1-7.
- 15 Yang ZJ, Zhang F, Still B, White M, Amstislavski P. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. Journal of Materials in Civil Engineering. 2017; 29(7):1-9.
- 16 Jones M, Bhat T, Kandare E, Thomas A, Joseph P, Dekiwadia C, Yuen R, John S, MA J, Wang CH. Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium - Biomass Composite Materials. Scientific Reports. 2018; 8:1-10.
- 17 Appels FVW, Camere S, Montalti M, Karana E, Jansen KMB, Dijksterhuis J, Krijgsheld P, Wösten HAB. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. Materials and Design. 2019; 161:64-71.
- 18 Appels FVW, Camere S, Montalti M, Karana E, Jansen KMB, Dijksterhuis J, Krijgsheld P, Wösten HAB. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. Materials and Design. 2019; 161:64-71.
- 19 Teixeira JL, Matos MP, Nascimento BL, Griza S, Holanda FSR, Marino RH. Production and mechanical evaluation of biodegradable composites by white rot fungi. Ciência e Agrotecnologia. 2019; 42(6):676-684.
- 20 Panamgama LA, Peramune P. Coconut coir pith lignin: A physicochemical and thermal characterization. International Journal of Biological Macromolecules. 2018; 113:1149-1157.
- 21 Obada DO, Kuburi LS, Dauda M, Umaru S, Doodoo-Arhin D, Balogun MB, Iliyasu I, Iorpenda MJ. Effect of variation in frequencies on the viscoelastic properties of coir and coconut husk powder reinforced polymer composites. Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2018.