

MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DO NINHO DA VESPA ASIÁTICA - UM CONTRIBUTO

Naim Sedira ¹, Ana Paula Gomes ², Miguel Nepomuceno ^{1,3}, Anabela Paiva ¹, Isabel Bentes ¹, Jorge Pinto ¹, Sandra Pereira ¹

¹ UTAD, CMADE | Portugal

² UBI, AEROG-LAETA | Portugal

³ UBI, CMADE | Portugal

Autor correspondente: naimsedira@utad.pt

Palavras-chave

Construção; Fachadas; Biomimético; Material natural; Vespa Asiática; MEV-EDS

Resumo

Muitos trabalhos de investigação têm vindo a ser desenvolvidos no sentido de encontrar novas soluções para os diversos contextos da ciência através da bio-inspiração. Este trabalho está centrado no estudo do ninho da vespa asiática e, em particular, no estudo do seu material de construção. Esta construção natural é complexa em todas as vertentes. A sua complexidade arquitetónica, estrutural, material, funcional, entre outros aspetos técnicos, são fatores que despertam a curiosidade, esta construção pode ainda apresentar dimensões relativamente grandes. Ela é construída e usada aproximadamente meio ano e não volta a ser reutilizada. Este é outro aspeto técnico que motiva um estudo tendo em conta a escassez de habitação a nível mundial. O material de construção também é interessante e inovador. Neste ponto, tentou-se compreender a constituição deste material através da realização de ensaios MEV-EDS de amostras do material do ninho retiradas em diferentes zonas. Amostras de folhas de árvore foram analisadas para serem usadas como referência. As imagens de MEV mostram que o ninho da vespa asiática é feito de fibras vegetais e pedaços de madeira mastigadas, com sulcos e poros para manipulação, troca de gases e regulação de temperatura e humidade. A análise EDS do material do ninho de vespas asiáticas indica origem vegetal, com elementos como carbono (C) e oxigénio (O) formando 82,31%, e magnésio (Mg), potássio (K), cálcio (Ca) e ferro (Fe) constituindo 9,43%. Alumínio (Al) e silício (Si) representam 7,41%. A saliva das vespas é crucial para a construção. Importa acrescentar que este material é utilizado na construção da fachada do ninho, a qual, apesar de estar diretamente exposta às intempéries, proporciona uma durabilidade adequada. O interior do ninho da vespa asiática também garante o conforto necessário para a reprodução destes insetos. Este trabalho tem como principal objetivo partilhar com a comunidade científica alguns dos resultados alcançados por esta equipa de investigação neste contexto.

1. INTRODUÇÃO

A Vespa Velutina Lepeletier, 1836 (Hymenoptera: Vespidae) é uma vespa asiática nativa das montanhas do sudeste da Ásia, desde a Caxemira até a Malásia, estendendo-se para leste até Taiwan e sudeste até Sulawesi, as ilhas Sunda e Timor. Existem 14 subespécies deste táxon [1], [2], que apresentam diferenças morfológicas, especialmente nas cores do corpo. Entre elas, está a subespécie Vespa Velutina Nigrithorax du Buysson, 1905 (China Meridional) [3]. Os ninhos de Vespa Velutina Nigrithorax (Du Buysson) tornaram-se um tópico de interesse devido à natureza invasiva desta espécie. A Vespa Velutina Nigrithorax, habitualmente conhecida como vespa asiática de pernas amarelas, espalhou-se rapidamente pela Europa, representando uma ameaça significativa para os polinizadores europeus [4]. A vespa de pernas amarelas, Vespa Velutina, é uma espécie invasiva originária da Ásia. Foi assinalada pela primeira vez na Europa (França, Lot-Et-Garonne) por Haxaire *et al.* em 2005 [5]. As vespas foram introduzidas através do comércio no sudoeste da França em 2004, ou até mesmo anteriormente [6] e, desde então, espalharam-se por vários países, incluindo o norte da Espanha, Portugal, Itália, Alemanha, Ilha Maiorca, Ilhas do Canal [7] e Reino Unido [8]. Em 1997, Janine M. Benyus introduziu o termo "biomimética", derivado das palavras gregas "BIOS", que significa "vida" e "mimese", que significa "imitação" [9]–[11]. A biomimética envolve o estudo e a imitação das estratégias da natureza, para abordar os desafios da humanidade e ajudar a resolver problemas [12]. De acordo com o Instituto de Biomimética [13], a biomimética é uma prática que se inspira na natureza para encontrar soluções inovadoras para os desafios do ser humano. Na engenharia civil, a biomimética emergiu como uma nova abordagem para enfrentar desafios de sustentabilidade e questões de gestão complexas no setor de construção. Esta pesquisa explorou a sua aplicação em arquitetura, construção de edifícios e engenharia civil, tentando alcançar uma compreensão mais aprofundada de como implementá-la [14].

Estudos biomiméticos sobre ninhos de pássaros podem proporcionar uma compreensão para o desenvolvimento de materiais de construção à base de terra com melhor qualidade. O ninho de pássaro andorinha-dos-beirais, construído com argila, pode servir como modelo biomimético para melhorar as técnicas de construção à base de terra. A análise do design estrutural dos ninhos de pássaros estudados, que demonstram níveis reduzidos de stresse e sistemas estruturais otimizados, pode oferecer uma compreensão mais profunda para o desenvolvimento de métodos de construção eficazes e de longa duração [15]. No contexto do Ninho da Vespa Asiática (NVA), a sua notável complexidade de construção tem suscitado interesse na investigação para compreender a sua estrutura interna. De uma forma não destrutiva, podemos recorrer a tomografia computadorizada (TC) e testes de raios-X para estudar a referida estrutura. Este conhecimento poderá guiar o desenvolvimento de novas técnicas e de novos materiais de construção em várias áreas. A arquitetura interna, os materiais e a funcionalidade dos ninhos de vespas asiáticas revelam o seu design complexo, oferecendo perspetivas valiosas sobre materiais, design e princípios de engenharia aplicáveis à engenharia civil. O estudo também explorou princípios de construção relevantes para esta área. Através da aplicação da biomimética, os ninhos de vespas asiáticas proporcionam perspetivas valiosas para o desenvolvimento de estruturas estáveis [16]. O objetivo deste estudo foi realizar uma análise minuciosa da microestrutura do material do ninho da vespa asiática. Para alcançar este objetivo, foram conduzidas análises iniciais de MEV-EDS nas folhas de árvores próximas ao local do ninho estudado, seguidas de análises de MEV-EDS nos materiais do ninho.

2. CONTEXTO

A construção de um ninho secundário pelas vespas asiáticas, que inclui um invólucro exterior e favos de várias camadas, geralmente envolve várias etapas, conforme se ilustra na Figura 1. Inicialmente, a rainha da vespa asiática seleciona um local adequado para o ninho, frequentemente em locais protegidos, como sob beirais, em galhos de árvores ou dentro de vegetação densa. Em seguida, ela começa a construir uma pequena fundação ou ponto de fixação para o ninho, usando fibras de madeira, saliva e outros materiais. Assim que a fundação está pronta, a rainha constrói a estrutura interna do ninho criando uma série de células hexagonais onde os ovos serão postos e as larvas se desenvolverão. Ela reúne fibras de madeira que são misturadas com saliva para formar um material semelhante a papel, que molda em células. Posteriormente, a rainha começa a construir o invólucro externo, que serve como uma camada protetora para as células internas e proporciona isolamento contra os fatores ambientais. Ela pode usar um método semelhante de reunir fibras de madeira e saliva para criar um material semelhante a papel para construir o invólucro externo. À medida que o ninho cresce, a rainha e as vespas operárias (se presentes) continuam a expandir e reforçar tanto o ninho interno quanto o invólucro externo, adicionando camadas adicionais de papel para fortalecer a estrutura. Ao longo do processo de construção, a rainha coloca ovos nas células do ninho interno e abastece algumas células com comida, como insetos mortos, para alimentar as larvas em desenvolvimento. Conforme a colónia amadurece, as vespas operárias assumem a construção e a manutenção do ninho, reparando qualquer dano e garantindo sua integridade estrutural geral. O ninho continua a crescer e a evoluir ao longo do tempo, atendendo às necessidades da colónia em expansão, e no final da temporada, novas rainhas e machos podem ser produzidos, iniciando o ciclo de estabelecimento de ninhos no ano seguinte.

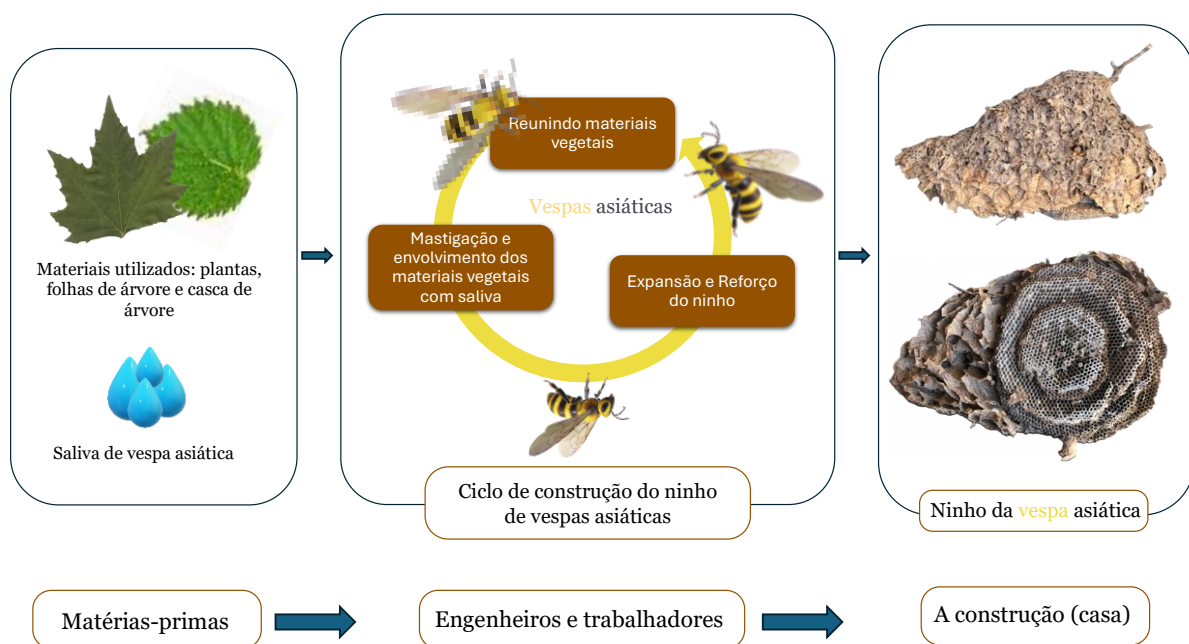


Figura 1. Passos de construção do ninho de vespas asiáticas.

3. METODOLOGIA

A Análise por Microscopia Eletrônica de Varrimento (MEV) com espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) é uma ferramenta poderosa para estudar a microestrutura e a composição química elementar dos materiais que constituem o ninho de vespas asiáticas (AWN). Quando aplicada a um ninho de vespas asiáticas, a MEV-EDS pode revelar as características morfológicas e a composição química elementar dos materiais de construção do ninho.

Neste estudo, foi recolhida uma amostra de cada folha das árvores presentes no ambiente circundante do AWN. Estas amostras foram analisadas usando MEV-EDS (Hitachi S-3400N) para examinar a sua estrutura e composição com precisão. Além disso, foram extraídas pequenas porções de material, tanto do invólucro externo como das paredes celulares do material semelhante a papel (P-LM) dentro do AWN, também denominados de favos. A análise MEV-EDS revelou importantes informações sobre a estrutura, morfologia da superfície e composição química desses fragmentos do P-LM do AWN. Esta abordagem analítica facilitou uma comparação entre os materiais semelhantes a papel que compõem a parte interna do ninho de vespas asiáticas e o resíduo das folhas das árvores, com o objetivo de compreender as origens do P-LM do AWN.

A análise por MEV-EDS foi usada para identificar a composição elementar das cinzas das folhas das árvores, permitindo compará-la com a composição elementar das cinzas do material semelhante a papel encontrado nos ninhos de vespas asiáticas, após a queima. Além disso, a mesma técnica foi aplicada para explorar as razões que dão origem às diferentes cores do invólucro externo do P-LM do AWN, investigando as variações na composição e na microestrutura entre as diferentes tonalidades presentes nesse invólucro.

4. RESULTADO

Este estudo analisa a microestrutura dos materiais que formam o invólucro externo do ninho de vespas asiáticas, que funciona como uma camada protetora (parede) para o favo dentro do ninho. Ao analisar a composição detalhada deste invólucro, procuramos entender a sua função na proteção do ninho, contra condições ambientais e na manutenção da integridade estrutural. Além disso, compreender a microestrutura desta camada protetora pode fornecer informações valiosas sobre as adaptações evolutivas das vespas asiáticas e, possivelmente, inspirar o desenvolvimento de materiais biomiméticos para aplicações na engenharia. Posteriormente, iremos analisar a anatomia da microestrutura e a composição química elementar das folhas de três espécies diferentes de árvores.

4.1. ANÁLISE POR MEV-EDS DO MATERIAL SEMELHANTE A PAPEL E DO MATERIAL DO INVÓLUCRO EXTERIOR DO NINHO DE VESPA ASIÁTICA

4.1.1. ANÁLISE POR MEV

Este estudo investiga a microestrutura do invólucro externo no ninho da vespa asiática, que funciona como uma camada protetora ou parede. Ao analisar a Figura 2, podemos observar a presença de sulcos e poros na microestrutura do invólucro externo.

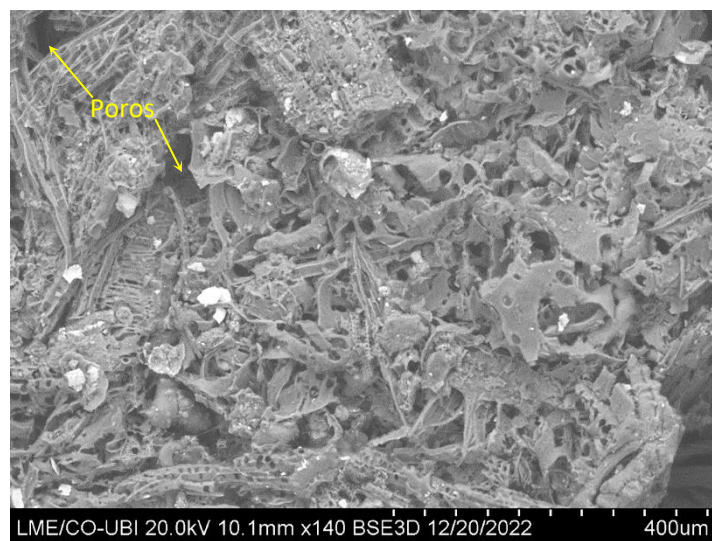


Figura 2. Imagem de MEV do invólucro externo que envolve os favos no ninho de vespas asiáticas.

A superfície do invólucro externo apresenta sulcos, que são usados para manipular e aplicar as fibras vegetais. Os sulcos também ajudam a aumentar a área de superfície e reduzir o peso do invólucro. Este também possui numerosos poros que permitem a troca de gases, a regulação da temperatura e o controle da humidade dentro do ninho. Os poros estão distribuídos de forma aleatória pela superfície do material que compõe o invólucro externo no ninho da vespa asiática. A forma geométrica e a morfologia microestrutural assemelham-se à estrutura celular da madeira macia, incluindo células de parênquima axial, colênquima e esclerênquima. O tecido parenquimático forma as partes mais macias das plantas e serve como tecido de preenchimento nos caules e folhas, com a capacidade para a fotossíntese. Por outro lado, o tecido esclerênquimático fornece suporte estrutural nas plantas devido às suas paredes celulares espessas e lignificadas, tornando-o rígido e quebradiço com o passar do tempo. As células de colênquima apresentam uma estrutura que se situa entre estes dois tipos de tecidos fundamentais [17]–[20]. Enquanto as células alongadas mostram semelhanças com as células de bainha de feixe caracterizadas por células mais largas alternando com células mais estreitas, o parênquima de reserva contém paredes celulares enrugadas juntamente com campos plasmodesmáticos ocorrendo dentro delas. A microestrutura do ninho de vespas asiáticas é comparável à estrutura celular da madeira macia, assemelhando-se especificamente a células de parênquima, colênquima e esclerênquima [21]. Além disso, as imagens de MEV na Figura 3, mostram traqueídeos longitudinais de primavera na membrana externa do ninho da vespa asiática.

A vespa asiática também utiliza tecido xilemático para construir seus ninhos, como é visto em imagens de MEV. Este tecido xilemático é composto por células alongadas formando um tubo contínuo e vasos que são compostos por várias células conectadas entre si. Células traqueídeas e vasos são os componentes do complexo tecido xilemático, ambos responsáveis pelo transporte de água e minerais das raízes da planta para suas folhas. As células traqueídeas são células alongadas que formam um tubo contínuo, enquanto os vasos são compostos por várias células conectadas entre si. Ambos os tipos de células possuem um lúmen oco através do qual a água e os minerais são transportados [22]–[24]. O invólucro externo do ninho da vespa asiática é composto por fibras vegetais mastigadas e secreção oral, formando um material semelhante a papel que protege a colônia de predadores e fatores ambientais. As fibras vegetais usadas para o invólucro externo são principalmente derivadas de tubos criivos ou vasos, que são células alongadas que transportam seiva nas plantas. Estas fibras podem ser vistas como pequenos fragmentos de material vegetal em imagens de MEV, assemelhando-se a *chips* de vegetais.

4.1.2. ANÁLISE EDS

A análise EDS mostra a composição química elementar do material que forma o invólucro externo do ninho de vespas asiáticas, sugerindo que a matéria-prima usada para construir o ninho provavelmente tem origem vegetal, conforme mostrado na Tabela 1. Esta dedução é baseada na presença de elementos comuns em plantas, como carbono, oxigénio, magnésio, alumínio, silício, sódio, potássio, cálcio, ferro, titânio e enxofre, embora em proporções variadas. O carbono (C) e o oxigénio (O), sendo os elementos mais abundantes, juntos constituem aproximadamente 82,31% do material, indicando uma presença significativa de matéria orgânica, característica de materiais à base de plantas. O magnésio (Mg), o potássio (K), o cálcio (Ca) e o ferro (Fe), que em conjunto representam cerca de 9,43% da composição, são nutrientes essenciais frequentemente encontrados em plantas, reforçando ainda mais a sua origem vegetal. O alumínio (Al) e o silício (Si), embora menos comuns nos tecidos das plantas, estão presentes em proporções de aproximadamente 7,41%, provavelmente devido a fatores ambientais ou contaminação durante a construção do ninho. O sódio (Na), o titânio (Ti) e o enxofre (S) são menos significativos, mas também podem estar presentes em quantidades mínimas em material vegetal ou serem introduzidos do ambiente durante a construção do ninho. No geral, a composição química está alinhada com a composição esperada de materiais derivados de plantas, indicando que as vespas asiáticas utilizam fibras vegetais ou outros materiais orgânicos como material de construção principal para os invólucros externos de seus ninhos. Além disso, a saliva das vespas desempenha um papel crucial na construção do ninho, ajudando na aderência de diferentes materiais vegetais. Embora a composição química fornecida na Tabela 1 represente principalmente a composição elementar dos materiais à base de plantas, é importante reconhecer que a saliva das vespas vai introduzir compostos orgânicos adicionais e proteínas à mistura.

Tabela 1. Composição química do material que constitui o invólucro externo do ninho da vespa asiática.

Elemento químico	% mássica (wt.%)
	invólucro externo
Carbono (C)	39,29
Oxigénio (O)	43,02
Magnésio (Mg)	1,45
Alumínio (Al)	3,37
Silício (Si)	4,04
Sódio (Na)	0,18
Potássio (K)	2,29
Cálcio (Ca)	0,25
Ferro (Fe)	5,44
Titânio (Ti)	0,57
Enxofre (S)	0,13

A saliva das vespas contém enzimas e proteínas que podem atuar como agentes ligantes, ajudando a cimentar as fibras vegetais mantendo-as juntas, criando assim uma estrutura coesa para o ninho. Ou seja, a saliva das vespas tem uma contribuição significativa para o processo de construção. Assim, a saliva das vespas serve como um componente crucial na construção do ninho, fornecendo adesão e coesão à estrutura.

4.2. PORQUE HÁ CORES DIFERENTES NO INVÓLUCRO EXTERNO DO NINHO DE VESPA ASIÁTICA?

Para entender os motivos subjacentes à variação de cor observada no invólucro externo do material do ninho de vespas asiáticas, foi realizada uma análise por MEV, tanto nas áreas mais escuras como nas áreas mais claras. A investigação revelou uma consistência notável na composição do material entre essas duas áreas, desafiando as expectativas iniciais. Ambas as áreas eram compostas principalmente por materiais de origem vegetal, conforme representado na Figura 3. Após uma análise detalhada, surgiram diferenças na microestrutura das áreas mais escuras (#522500) (Figura 3a) e das áreas mais claras (#F1F0EA) (Figura 3b). Apesar da uniformidade na composição elementar nas duas áreas, em particular, as áreas mais escuras têm fragmentos de plantas maiores em comparação com as áreas mais claras. Essa variação no tamanho dos fragmentos sugere uma disparidade no processo ou na deposição de materiais vegetais durante a construção do ninho, contribuindo assim, para as diferenças observadas na coloração. Além disso, as imagens de MEV revelam diferenças no arranjo das estruturas celulares entre as áreas mais escuras e as áreas mais claras. As áreas mais escuras apresentam principalmente traqueídeos de lenho jovem longitudinais, enquanto as áreas mais claras exibem tecido parenquimatoso transversal, com origem em células de madeira de coníferas. Em relação à disparidade de coloração entre as duas áreas, observou-se que a diferença ocorria dos diferentes tipos de materiais utilizados. As áreas mais escuras (#522500) incorporavam materiais de várias origens, incluindo células de madeira de folhosas, tecidos foliares e gramíneas, levando à sua tonalidade mais escura. Por outro lado, as áreas mais claras (#F1F0EA) eram formadas principalmente por células de madeira de coníferas, contribuindo para sua coloração mais clara.

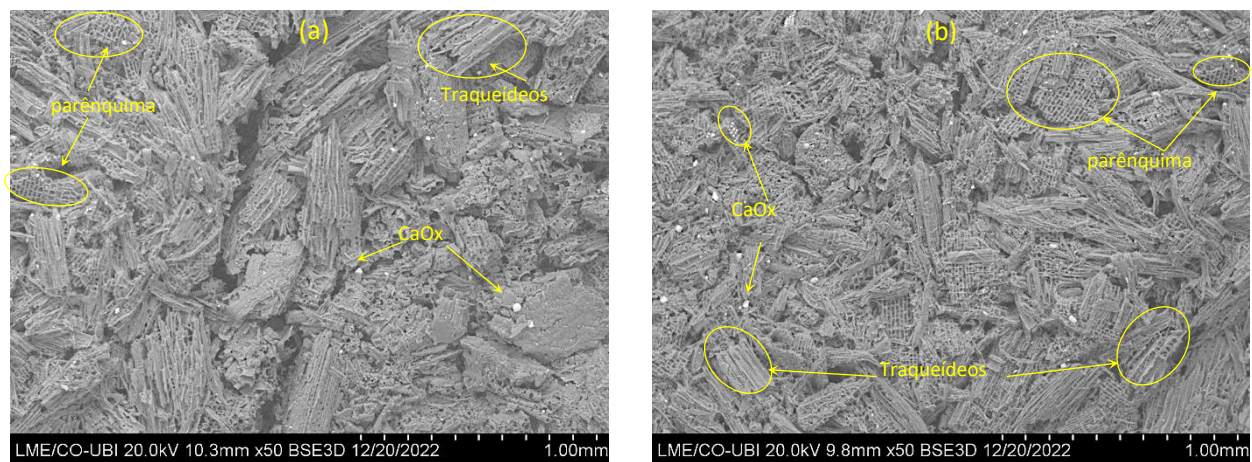


Figura 3. Parte externa do ninho de vespa asiática, a)- área de cor mais escura; b)- Área de cor mais clara.

Numa análise mais detalhada, as imagens de MEV obtidas de diversos segmentos com distintas regiões de coloração são apresentadas para uma análise da microestrutura e morfologia, revelando quais os fatores que contribuem para as diferentes cores observadas no material, ver figura 4. A representação de cores é delineada em diferentes regiões de interesse (RDI): [RDI: 1] apresenta uma cor Iroko (#47301F), [RDI: 2] exibe uma cor de linho (#f2e4da) e [RDI: 3] apresenta uma cor de camurça (#A0785A). Na região de interesse [RDI: 2], é observada uma composição diversificada, consistindo em várias fibras, fragmentos de plantas e fios delicados. Essa rede complexa serve para interconectar e unir os fragmentos de plantas.

Após uma análise mais detalhada utilizando MEV, foram identificadas características morfológicas distintas nas regiões escuras de interesse, especificamente [RDI: 1]. A inspeção dessas áreas revela morfologias que contrastam significativamente com as observadas nas outras regiões de interesse [RDI: 2 e RDI: 3]. A imagem de MEV da zona [RDI: 1] exibe uma morfologia irregular, caracterizada por uma abundância de partículas com um número reduzido de materiais interconectados semelhantes a fios. Essa particularidade sugere uma diferença em relação à estrutura mais uniforme e interconectada encontrada nas zonas [RDI: 2 e RDI: 3]. A menor presença de materiais semelhantes a fios e fragmentos de plantas nessas áreas indica variações nos processos de composição ou montagem dos materiais utilizados pelas vespas asiáticas na construção do ninho. Essas diferenças contribuem para as características morfológicas únicas observadas nas imagens de MEV das várias regiões da amostra do envelope externo.

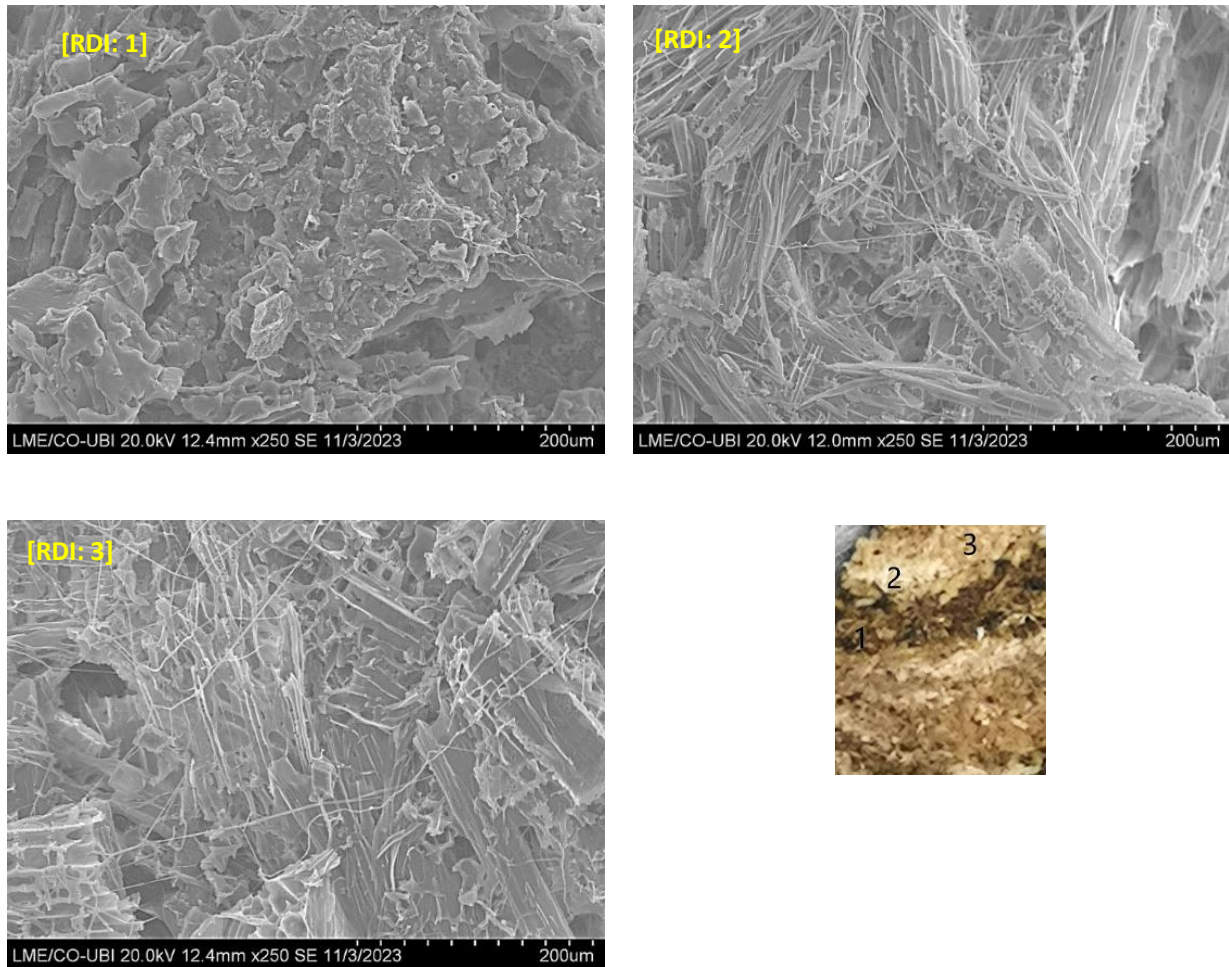
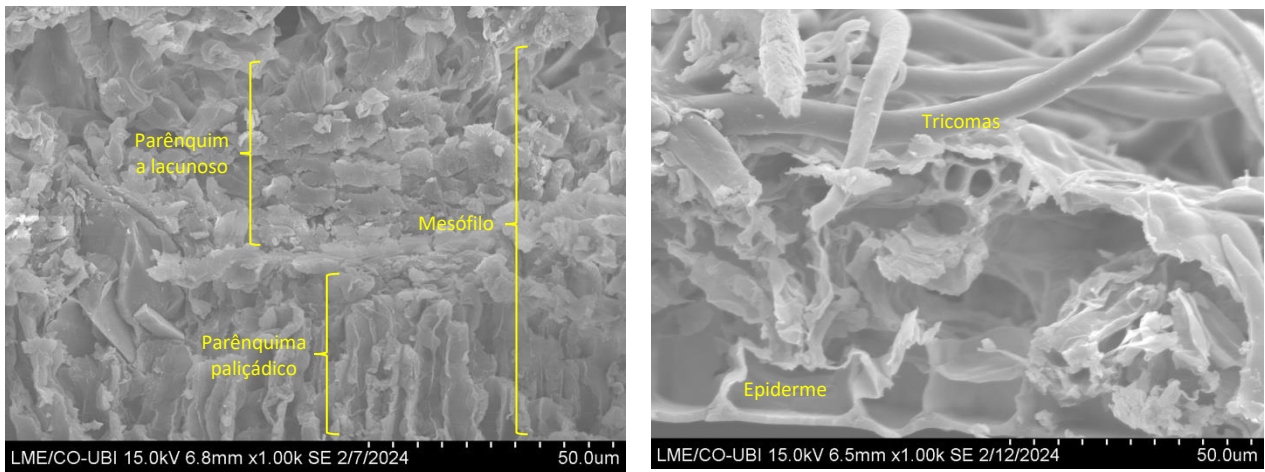


Figura 4. Imagens por MEV do invólucro externo de AWN: [RDI: 1] Cor iroko, [RDI: 2] Cor de linho, [RDI: 3] Cor de camurça, mostra a diferença entre as cores da superfície. A última imagem é a amostra do invólucro externo AWN.

4.3. ANÁLISE POR MEV-EDS DE FOLHAS DE ÁRVORES PRÓXIMAS AO AWN

As imagens de MEV na Figura 5 fornecem uma visão detalhada da folha de três árvores diferentes (a): aveleira; (b): castanheiro; e (c): lodo, revelando estruturas complexas invisíveis a olho nu, com componentes distintos que constituem a anatomia da folha. Cada uma das três folhas exibe microestruturas diferentes. Entre essas estão os tricomas foliares, que apresentam uma forma semelhante a agulhas, proporcionando uma camada adicional de defesa contra agressores ambientais [25]. A epiderme, que forma a camada mais externa da folha, atua como uma barreira protetora enquanto permite a troca de gases. Sob a epiderme estão as células do mesofilo paliádico, densamente compactadas para maximizar a absorção de luz para a fotossíntese. Adjacente ao mesofilo paliádico estão as células do mesofilo esponjoso, caracterizadas por sua disposição irregular e papel na facilitação da troca gasosa e retenção de água. Por fim, o feixe vascular, composto por tecidos de xilema e floema, serve como sistema de transporte de água, nutrientes e açúcares ao longo da folha. Juntos, esses componentes formam uma rede dinâmica e interconectada dentro da folha, contribuindo para sua função e resistência em diversas condições ambientais.



(a)

(b)



(c)

Figura 5. Imagens de SEM das folhas de árvores próximas ao ninho das vespas asiáticas: (a): aveleira; (b): castanheiro; (c): lodo.

A Tabela 2 apresenta a composição química elementar em percentagem mássica de folhas de três árvores diferentes (aveleira, castanheiro e lodo). Carbono (C) e Oxigénio (O) são os elementos predominantes em todas as folhas, com o castanheiro apresentando a maior percentagem de carbono (61,44 wt.%), seguida pela aveleira (58,79 wt.%) e pelo lodo (56,80 wt.%).

Tabela 2. Composição química das três folhas de árvores (Aveleira, Castanheiro e Lodo).

Elemento químico	Percentagem mássica (wt.%)		
	Aveleira	Castanheiro	Lodo
Carbono (C)	58,79	61,44	56,80
Oxigénio (O)	38,05	36,63	39,96
Magnésio (Mg)	0,41	-	0,14
Alumínio (Al)	0,15	-	-
Silício (Si)	0,25	-	0,79
Fósforo (P)	0,22	0,20	0,14
Potássio (K)	1,02	1,24	0,61
Cálcio (Ca)	0,80	0,17	1,45
Ferro (Fe)	0,16	-	-
Cobre (Cu)	0,17	0,19	-
Enxofre (S)	-	0,13	0,11

O Magnésio (Mg) está presente apenas na aveleira (0,41 wt.%) e no lodo (0,14%), enquanto o Fósforo (P) é encontrado em todas as três folhas, com valores variando de 0,14 wt.% a 0,22 wt.%. O Potássio (K) é mais abundante no castanheiro (1,24 wt.%),

seguido pela aveleira (1,02 wt.%) e pelo lodo (0,61 wt.%). O Cálcio (Ca) mostra uma distribuição irregular, com o lodo apresentando a maior percentagem (1,45 wt.%), seguida pela aveleira (0,80 wt.%) e pelo castanheiro (0,17 wt.%). O Silício (Si) está presente apenas na aveleira (0,25 wt.%) e no lodo (0,79 wt.%). O Cobre (Cu) é encontrado no castanheiro (0,19 wt.%) e na aveleira (0,17 wt.%), enquanto o Enxofre (S) está presente no castanheiro (0,13 wt.%) e no lodo (0,11 wt.%). Estes dados indicam diferenças na composição química das folhas das diferentes árvores próximas ao ninho de vespas asiáticas. A variação na composição química das folhas das diferentes árvores pode ser atribuída a uma série de fatores. Primeiramente, as diferentes espécies de árvores possuem características genéticas distintas que influenciam sua composição química. Além disso, a disponibilidade de nutrientes no solo, a exposição a diferentes condições ambientais, como luz solar, temperatura e humidade, e até mesmo fatores climáticos sazonais podem afetar a composição química das folhas. Ademais, as interações entre as árvores e outros organismos, como microrganismos do solo e insetos, também podem desempenhar um papel na variação da composição química das folhas [26]. Múltiplos fatores biológicos, ambientais e ecológicos contribuem para as diferenças observadas na composição química das folhas das árvores.

5. CONCLUSÕES

O invólucro externo do ninho da vespa asiática desempenha várias funções cruciais. Em primeiro lugar, protege os favos de predadores e os defende de contaminação. Além disso, bloqueia a entrada de luz solar e radiação UV no ninho, protegendo os ovos, as larvas e o processo de pupação. O invólucro externo atua como uma barreira à prova de água, protegendo os favos da infiltração de água. Também desempenha um papel fundamental na manutenção dos níveis ótimos de humidade, que são críticos para várias fases do ciclo de vida da vespa, incluindo a postura de ovos pela vespa rainha e o desenvolvimento de larvas e pupação dentro de casulos. Estes processos ocorrem dentro dos favos sob condições ambientais específicas. Além disso, o invólucro externo regula a temperatura dentro do ninho, atuando como um isolante térmico, reduzindo a transferência de calor entre o ambiente interno e externo do ninho. Este isolamento é particularmente importante quando o ninho está em contato com ramos de árvores ou dentro do alcance de influência radioativa. Além disso, a presença de sulcos e poros na microestrutura do invólucro externo é importante para a troca de gases, que é vital para a sobrevivência das vespas.

O principal componente dos ninhos de vespas asiáticas é um material de origem vegetal. Os elementos químicos carbono e oxigénio representam 82,31% da sua composição química, componentes minerais significativos foram identificados em 17,69%. A construção de ninhos de vespas asiáticas envolve o uso de material recolhido do ambiente circundante, incluindo madeira e folhas de árvores. Os elementos químicos inorgânicos estão presentes nos materiais de origem vegetal, pois as plantas dependem de minerais essenciais absorvidos do solo para crescer e se desenvolver.

Por outro lado, ao comparar os valores das tabelas 1 e 2, observa-se que o material do invólucro externo do ninho contém percentagens mássicas de Mg, Al, Si, K e Fe superiores às encontradas para os mesmos elementos químicos nas diversas folhas. Isso indica que as vespas asiáticas, além de folhas e pedaços de madeira, também recolhem outros componentes para construir o invólucro externo.

Com base nas propriedades do invólucro externo do ninho de vespas asiáticas na proteção dos favos, este tem várias funções, como proteger os favos da luz solar e da radiação UV e funcionar como isolamento térmico, além de manter a humidade constante dentro do ninho. Podemos inspirar-nos nas propriedades do material do invólucro externo para fabricar painéis de parede. Esses painéis poderiam oferecer proteção contra radiação solar, proporcionar isolamento térmico eficaz e ajudar a regular a humidade interna, melhorando a eficiência energética e o conforto dos ambientes construídos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) através do projeto UIDB/04082/2020 (CMADE).

Referências

- [1] J. Van Der Vecht, "The Vespinae of the Indo-Malayan and Papuan Areas (Hymenoptera, Vespidae)," *Zool. Verh.*, vol. 34, no. 1, pp. 1–82, 1957, [Online]. Available: <http://www.repository.naturalis.nl/record/317560%5Cnhttp://www.repository.naturalis.nl/document/148846>.
- [2] J. Van Der Vecht, "Notes on oriental Vespinae, including some species from China and Japan (Hymenoptera, Vespidae)," *Zool. Meded.*, vol. 36, no. 13, pp. 205–232, 1959, [Online]. Available: <http://www.repository.naturalis.nl/record/318251>.
- [3] C. Ries, N. Schneider, F. Vitali, and A. Weigand, "First records and distribution of the invasive alien hornet *Vespa velutina nigrithorax* du Buysson, 1905 (Hymenoptera: Vespidae) in Luxembourg," *Bull. la Société des Nat. Luxemb.*, vol. 123, pp. 181–193, 2021.

- [4] P. J. Kennedy, S. M. Ford, J. Poidatz, D. Thiéry, and J. L. Osborne, "Searching for nests of the invasive Asian hornet (*Vespa velutina*) using radio-telemetry," *Commun. Biol.*, vol. 1, no. 1, 2018, doi: 10.1038/s42003-018-0092-9.
- [5] J. Haxaire, J.-P. Tamisier, and J.-P. Bouguet, "*Vespa velutina* Lepeletier, 1836, une redoutable nouveauté pour la faune de France (Hym., Vespidae)," *Bulletin de la Société entomologique de France*, vol. 111, no. 2, p. 194, 2006, doi: 10.3406/bsef.2006.16309.
- [6] M. Arca et al., "Reconstructing the invasion and the demographic history of the yellow-legged hornet, *Vespa velutina*, in Europe," *Biol. Invasions*, vol. 17, no. 8, pp. 2357–2371, 2015, doi: 10.1007/s10530-015-0880-9.
- [7] K. Monceau and D. Thiery, "The Asian Yellow-legged advance of implacable Hornet: the a bee-killer," *Br. Wildl.*, no. March 2018, 2017.
- [8] G. E. Budge et al., "The invasion, provenance and diversity of *Vespa velutina* Lepeletier (Hymenoptera: Vespidae) in Great Britain," *PLoS One*, vol. 12, no. 9, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0185172.
- [9] J. M. Benyus, *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. London: HarperCollins Publishers Ltd., 1997.
- [10] N. Verbrugghe, E. Rubinacci, and A. Z. Khan, "Biomimicry in Architecture: A Review of Definitions, Case Studies, and Design Methods," *Biomimetics*, vol. 8, no. 1, 2023, doi: 10.3390/biomimetics8010107.
- [11] N. Sedira, J. Pinto, I. Bentes, and S. Pereira, "Bibliometric analysis of global research trends on biomimetics, biomimicry, bionics, and bio-inspired concepts in civil engineering using the Scopus database," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 19, no. 4, p. 56, 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad3ff6>.
- [12] M. S. Aziz and A. Y. El Sherif, "Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation," *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 707–714, 2016, doi: 10.1016/j.aej.2015.10.015.
- [13] "What Is Biomimicry? – Biomimicry Institute." <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/#> (accessed Feb. 29, 2024).
- [14] M. AlAli, Y. Mattar, M. A. Alzaim, and S. Beheiry, "Applications of Biomimicry in Architecture, Construction and Civil Engineering," *Biomimetics*, vol. 8, no. 2, 2023, doi: 10.3390/biomimetics8020202.
- [15] B. Silva, J. Correia, F. Nunes, P. Tavares, H. Varum, and J. Pinto, "Bird nest construction - Lessons for building with earth," *WSEAS Trans. Environ. Dev.*, vol. 6, no. 2, pp. 95–104, 2010.
- [16] N. Sedira, J. Pinto, M. Ginja, A. P. Gomes, M. C. S. Nepomuceno, and S. Pereira, "Investigating the Architecture and Characteristics of Asian Hornet Nests: A Biomimetics Examination of Structure and Materials," *Materials (Basel)*, 2023.
- [17] I. C. Osterkamp et al., "Changes of wood anatomical characters of selected species of *araucaria* during artificial charring: Implications for palaeontology," *Acta Bot. Brasiliica*, vol. 32, no. 2, pp. 198–211, 2018, doi: 10.1590/0102-33062017abb0360.
- [18] D. Keunecke, S. Hering, and P. Niemz, "Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce," *Wood Sci. Technol.*, vol. 42, no. 8, pp. 633–647, 2008, doi: 10.1007/s00226-008-0192-7.
- [19] D. Chen, L. D. Melton, D. J. McGillivray, T. M. Ryan, and P. J. Harris, "Changes in the orientations of cellulose microfibrils during the development of collenchyma cell walls of celery (*Apium graveolens* L.)," *Planta*, vol. 250, no. 6, pp. 1819–1832, 2019, doi: 10.1007/s00425-019-03262-8.
- [20] X. L. Jia et al., "De novo assembly, transcriptome characterization, lignin accumulation, and anatomic characteristics: Novel insights into lignin biosynthesis during celery leaf development," *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1–14, 2015, doi: 10.1038/srep08259.
- [21] C. E. J. Botha, R. H. M. Cross, and J. Gerber, "The microstructure of plasmodesmata in internodal stem tissue of the *Saccharum* hybrid var. NCo376: Evidence for an apoplasmic loading pathway," *S. Afr. J. Sci.*, vol. 100, no. 11–12, pp. 619–623, 2004.
- [22] A. L. Loyd, B. W. Held, E. R. Linder, J. A. Smith, and R. A. Blanchette, "Elucidating wood decomposition by four species of *Ganoderma* from the United States," *Fungal Biol.*, vol. 122, no. 4, pp. 254–263, 2018, doi: 10.1016/j.funbio.2018.01.006.
- [23] S. Carlquist and E. L. Schneider, "Equisetum xylem: SEM studies and their implications," *Am. Fern J.*, vol. 101, no. 3, pp. 133–141, 2011, doi: 10.1640/0002-8444-101.3.133.

[24] D. E. Fosket, *Plant Growth and Development: A Molecular Approach*. California, 1994.

[25] G. Karabourniotis, G. Liakopoulos, D. Nikolopoulos, and P. Bresta, "Protective and defensive roles of non-glandular trichomes against multiple stresses: structure–function coordination," *J. For. Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1007/s11676-019-01034-4.

[26] J. I. Burneo, Á. Benítez, J. Calva, P. Velastegui, and V. Morocho, "Soil and leaf nutrients drivers on the chemical composition of the essential oil of *siparuna muricata* (Ruiz & pav.) A. DC. from Ecuador," *Molecules*, vol. 26, no. 10, 2021, doi: 10.3390/molecules26102949.