



Bloom

**Valorização de macroalgas: Síntese de estruvite
e sua aplicação como retardantes de combustão**

Alunos

Bernardo Camisão | Francisco Ribeiro | Raquel Pires

Professora

Elsa Oliveira

Consultores Científicos

Doutora Goreti Sales | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC)

Doutora Isabel da Costa | CiiMAR, Universidade do Porto

Doutora Helena Sant'Ovaia | Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP)

Concurso Atlântico Júnior

Porto | 2026

ÍNDICE

Resumo	2
Palavras-chave:.....	2
Introdução	2
1.1 Incêndios em Portugal.....	2
1.2 Mitigação de <i>blooms</i> algais	2
1.3 Estruvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	3
1.4 Retardantes de incêndio.	3
1.5 Objetivo	4
2. Pré - processamento das algas	4
2.1 Recolha	4
2.2 Preparação das amostras.....	5
2.3 Desidratação e trituração	6
3. Procedimento de extração e precipitação	7
3.1 Hidrólise térmica e química por acidificação.	7
3.2 Filtragem.....	8
3.3 Remoção seletiva de cálcio	8
3.4 Precipitação da estruvite.....	9
3.5 Recuperação do precipitado	11
4. Análise do precipitado	11
4.1 Métodos de análise	11
4.2. Rendimento	13
5. Avaliação da viabilidade ambiental	14
6. Avaliação como retardante de combustão	15
7. Viabilidade económica	18
Agradecimentos	19
Referências bibliográficas	20

Resumo

Todos os anos, Portugal enfrenta incêndios florestais de dimensões severas que resultam na degradação de ecossistemas terrestres e com graves prejuízos socioeconómicos. Paralelamente, na costa marítima nacional tem-se verificado a proliferação excessiva de macroalgas (*blooms* algais), fenómenos que desencadeiam a eutrofização das águas, a perda drástica da biodiversidade e fortes quebras no setor do turismo balnear. O projeto *Bloom* propõe uma abordagem sustentável e inovadora assente nos princípios da economia circular: a valorização da biomassa excessiva e/ou prejudicial de macroalgas como fonte sustentável de precursores minerais para a síntese laboratorial de estruvite. A estruvite é um mineral amplamente reconhecido pelas suas propriedades retardantes de fogo, apresentando solubilidade em água e capacidade de formar uma camada protetora de carbonização quando submetida a elevadas temperaturas. Ao otimizar um protocolo laboratorial que extrai e precipita estes minerais a partir de macroalgas, o presente trabalho visa instituir uma alternativa renovável e ecológica aos compostos convencionais utilizados como retardantes e, em simultâneo, mitigar problemas ambientais.

Palavras-chave:

Estruvite; Macroalgas; Retardante de combustão; *Blooms* algais; Sustentabilidade; Economia circular.

Introdução

1.1 Incêndios em Portugal

Todos os anos, Portugal enfrenta incêndios florestais com dimensões significativas que contribuem não só para destruição dos ecossistemas, como para a poluição do nosso planeta, com para a emissão de grandes quantidades de gases tóxicos e também para a exaustão e perigo das populações, provocando um atraso e danos às atividades económicas. Em 2017, Portugal enfrentou incêndios devastadores, nomeadamente em Pedrógão Grande, onde se registaram várias vítimas mortais. Nos anos seguintes, a aposta em medidas de prevenção foi clara, mas mesmo assim provou-se ser insuficiente, tendo-se registado grandes incêndios florestais, nomeadamente em 2025. O nosso país precisa de novas medidas de prevenção, que garantam a sustentabilidade dos ecossistemas e que sejam eficazes, sendo este um dos pontos de ação do projeto *Bloom*.

1.2 Mitigação de *blooms* algais

Os ecossistemas marinhos representam uma parte essencial da economia portuguesa e são essenciais à manutenção do equilíbrio entre os diferentes ecossistemas. No entanto, estes ecossistemas são, muitas vezes, perturbados pelo aparecimento quantidades excessivas de algas, em fenómenos denominados *blooms*.

Estas algas surgem devido a uma elevada reprodução, muitas vezes em profundidade, que culmina na ascensão de grandes quantidades de algas quando as águas aquecem.

Estes *blooms* algais acabam por atingir a costa, o que resulta, muitas vezes, no bloqueio das praias, acarretando danos severos para a economia, que depende seriamente do turismo de praia. Para além disso, a grande quantidade de algas resulta em fenómenos de eutrofização – as algas libertam quantidades tóxicas de nutrientes e consomem o oxigénio na água, resultando em danos nos ecossistemas marinhos ⁽³⁾. A eutrofização causa uma redução drástica da concentração de oxigénio na água- o que diminui a capacidade de absorção de carbono da água, contribuindo para o maior desequilíbrio da atmosfera. Para além disso, a camada de algas formada na superfície oceânica impede a fotossíntese de outras espécies fotossintéticas, resultando diretamente numa redução da biodiversidade.

Como solução a esta problemática, são procuradas aplicações destas algas impulsionando a economia verde e promovendo a valorização de um recurso geralmente desperdiçado.

Neste contexto, este projeto propõe fazer recurso às algas provenientes dos *blooms*, como fonte de substâncias minerais que possibilitem a produção de estruvite.

Uma vez que este projeto foi iniciado no inverno não nos foi possível recolher exemplares provenientes de *blooms* ou exemplares classificados como espécies invasoras. Assim sendo, a nossa seleção recaiu sobre um género de alga verde (*Ulva* sp.), que normalmente origina *blooms* na nossa costa e sobre uma espécie de alga castanha (*Fucus* sp.) que encontramos em abundância e nos foi recomendada por uma investigadora da área. No futuro gostaríamos de testar o nosso protocolo com a espécie *Rugulopteryx okamurae*, uma espécie invasora que tem provocado *blooms* nas áreas na proximidade da cidade de Lisboa e em várias praias da costa algarvia.

1.3 Estruvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

A estruvite é quimicamente fosfato de magnésio e amónio hexahidratado, um mineral cujas diferentes propriedades já foram estudadas. A estruvite não é solúvel em água e demonstra fortes propriedades como retardantes de fogo. Existem vários protocolos laboratoriais publicados que demonstram como realizar a sua produção através da biomassa de microalgas presentes em efluentes, sendo que a sua precipitação representa um grande desafio às operações das ETARs e ETAs. Para além disso, a estruvite é um mineral que se encontra presente na urina humana ou na urina de felinos.

Este projeto pretende definir um protocolo laboratorial que permita a produção de estruvite através da biomassa de macroalgas marinhas.

1.3 Retardantes de incêndio

Os retardantes de incêndio são produtos que, por base de um agente químico ou físico, atrasam ou impedem o avanço das chamas, sendo o seu principal objetivo retardar o avanço dos fogos. Os retardantes de incêndio podem ser impregnados em materiais de construção, de forma a impedir o avanço das chamas, em

zonas de risco, ou administrados estrategicamente em zonas de fogo ativas com o objetivo de atrasar/impedir o avanço da frente do incêndio e permitir às forças de segurança uma atuação mais eficaz e ponderada. Esta última estratégia pode ser implementada de diversas formas, mas é mais comumente utilizada por dispersão aérea, fazendo recurso a aeronaves. Nesta situação o produto tem de ter uma composição muito bem estudada, para evitar danos às áreas florestais. Estes produtos atuam com base num agente retardante (geralmente nitratos de fósforo) suspenso numa solução aquosa, que quando entra em contacto com o calor, evapora a água e forma uma camada de carbono que impede o avanço do fogo, isto é, a carbonização. Os agentes retardantes de incêndio comercializados atualmente derivam de uma síntese artificial que utiliza o nitrogénio do ar e o fósforo extraído em minas, dependendo fortemente do gás natural como fonte de hidrogénio. É importante notar que os retardantes de incêndio, no seu peso bruto, previamente à adição de água, são compostos por cerca de 85% de nitrato de fósforo, e estes recursos são finitos, estando o fósforo na lista dos elementos com maior carência no planeta, reforçando a necessidade de encontrar novas fontes para estes recursos.

1.4 Objetivo

O projeto *Bloom* visa partir de um problema que tem afetado a biodiversidade marinha dos ecossistemas existentes nas costas nacionais, tornando-o num benefício e, simultaneamente, tentar mitigar os danos provocados pelos incêndios florestais. A estruvite, e as suas propriedades retardantes de incêndio pode representar um elemento-chave para o combate e prevenção dos incêndios florestais, enquanto o aproveitamento da biomassa algácea que emerge em excesso na costa portuguesa poderá ter um grande impacto ambiental e económico. Neste projeto alvejamos produzir estruvite a partir de macroalgas marinhas que possam estar associadas a danos ambientais, valorizando um recurso marinho e mitigando a problemática dos incêndios florestais.

2. Pré - processamento das algas

2.1 Recolha

A recolha de algas marinhas foi efetuada em 3 praias da região norte de Portugal (Praia de Labruge; Praia de Vilã Chã; Praia do Homem do Leme). Recolhemos algas verdes (*Ulva* sp.) e algas castanhas (*Fucus* sp.)⁽⁸⁾. Para preservar as espécies recolhemos apenas a parte aérea, permitindo o seu futuro crescimento. A primeira recolha ocorreu na Praia de Vilã Chã no dia 7 de dezembro de 2025, a segunda ocorreu na Praia do Homem do Leme nos dias 13 e 14 de dezembro de 2025 e, por fim, fomos no dia 7 de fevereiro de 2026 à Praia de Labruge. Em todas as saídas de campo conseguimos efetuar a recolha de exemplares, contudo, devido às condições atmosféricas e de forma a assegurar uma recolha segura, esta tarefa foi dificultada, não tendo sido possível obter grandes quantidades de amostras. É importante referir que, além das condições atmosféricas terem sido adversas, o facto de termos realizado estas visitas ao terreno no inverno foi também

um fator que dificultou a recolha de biomassa e, conseqüentemente, um menor número de ensaios laboratoriais. No inverno, muitas das espécies de algas não finalizaram o seu ciclo reprodutivo, motivo pelo qual não existiam em abundância.

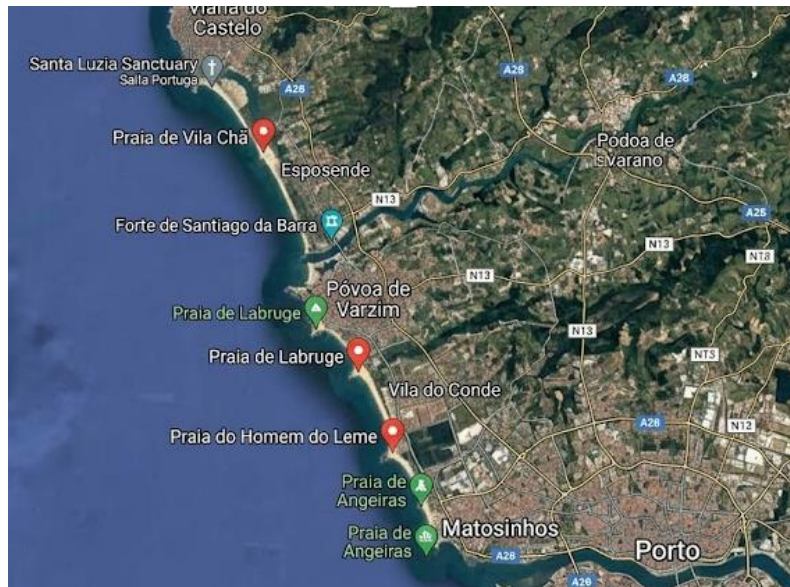


Fig.1 - Mapa com os pontos de recolha de algas assinalados a vermelho.



Fig. 2 e 3 - Recolha de algas na praia de Vila Chã.

2.2 Preparação das amostras

Após a recolha de matéria-prima no trabalho de campo, foi necessário lavar as algas de modo a retirar qualquer resíduo indesejado. Tentamos reduzir ao máximo a presença de sal nas mesmas lavando-as com água. Após essa lavagem inicial verificamos, contudo, a presença de pequenos animais marinhos como, por exemplo, moluscos e areias. Para eliminar este material indesejado utilizamos pinças e retiramos

cuidadosamente os mesmos. A lavagem das algas foi sucedida por uma secagem utilizando papel absorvente – as algas ficam cerca de uma hora em repouso sobre este papel e, em seguida, foram transferidas para papel vegetal.

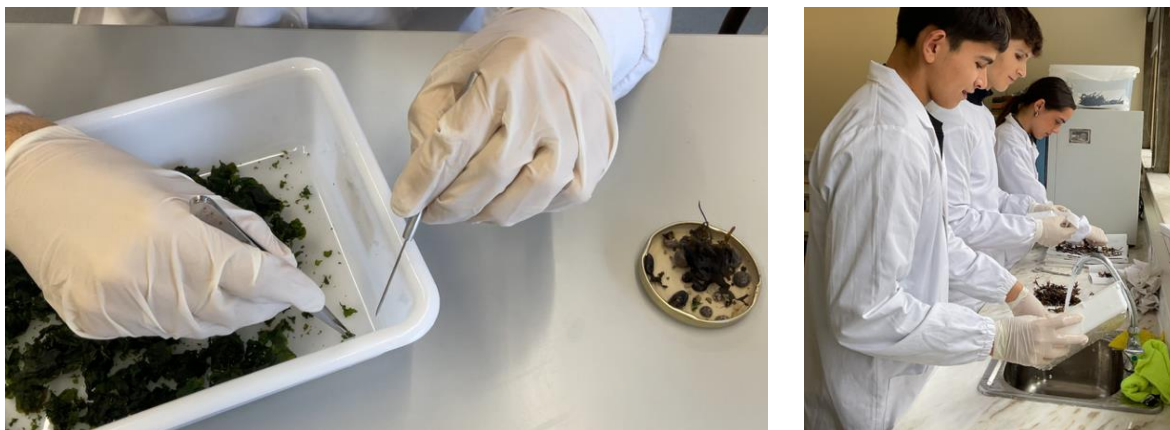


Fig. 4 e 5 – Tratamento das amostras (lavagem e retirada de impurezas).

2.3 Desidratação e trituração

As algas foram desidratadas numa estufa a 70°C durante 4 horas. Este é o procedimento comum no processamento das algas, os 70° foi a temperatura indicada pela Doutora Isabel Costa (CiiMAR), uma vez que é elevada o suficiente para desidratar as algas sem degradar compostos necessários à precipitação da estruvite. Com o objetivo de aumentar a eficácia da extração deste composto mineral, a biomassa foi posteriormente triturada num moinho de esferas e peneirada de modo a separar pedaços maiores que foram novamente triturados até atingir um produto semelhante a um pó. A trituração das algas aumenta a superfície de contacto com os ácidos utilizados na hidrólise e, simultaneamente, a ação mecânica permite degradar a parede celular das algas e disponibilizar os conteúdos internos da célula para a solução. Este pó foi armazenado num meio seco e sem exposição a luz, tentando impedir a possível degradação do produto até à realização dos testes laboratoriais de precipitação.



Fig. 6 e 7 – Secagem das amostras em estufa; Alga castanha processada (triturada num moinho de esferas).

3. Procedimento de extração e precipitação

3.1 Hidrólise térmica e química por acidificação.

A biomassa desidratada e triturada foi misturada com água desionizada com uma concentração mássica de 3% de sólidos ⁽⁶⁾ num volume total de 300mL colocado em fracos laboratoriais com rosca (figuras 9 e 10) – recipientes resistentes a elevadas temperaturas e valores baixos de pH. O pH foi ajustado para 1.0 (adicionando ácido clorídrico com um conta-gotas), tendo sido testado o procedimento para valores de pH de 2.0 e 3.0, o que se revelou menos eficaz. O valor de pH baixo impede que o cálcio, possivelmente presente nas algas, reaja com o fósforo (PO_4^{3-}) posteriormente precipitado, uma vez que em valores de pH inferiores a 3.0 o fósforo não é solúvel (figura 8) ⁽⁵⁾. A mistura foi agitada para homogeneizar e posteriormente sujeita a uma hidrólise de alta pressão e temperatura numa autoclave a 121° durante 180 minutos (3 horas), tendo também sido testados para cada valor de pH a mesma hidrólise em períodos de 1h e 6h, que não se revelaram eficazes. Este processo contribui para a decomposição dos organelos e estruturas constituintes das células das algas que armazenam o fósforo e o nitrogénio, como os fosfolípidos, as mitocôndrias e aminoácidos, ficando estes posteriormente solúveis, em valores de pH maiores (9.0) sob a forma de fosfato e amónio. No final da hidrólise os recipientes continham um sólido depositado e uma solução contendo os produtos solúveis das algas a pH 1.0 como o cálcio.

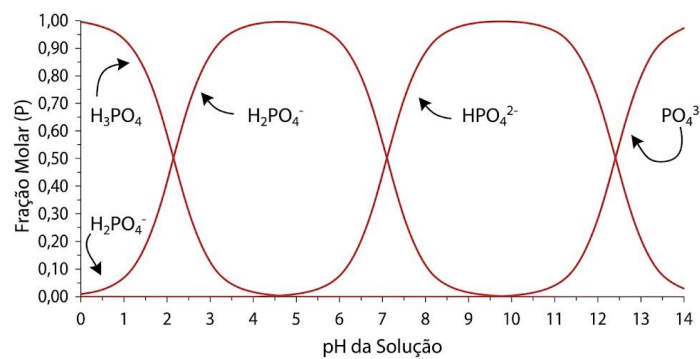


Fig. 8 – Solubilidade do fósforo (P) em diferentes valores de pH e diferentes protólises.



Fig. 9 - Resultado da hidrólise térmica e química após 1 hora.

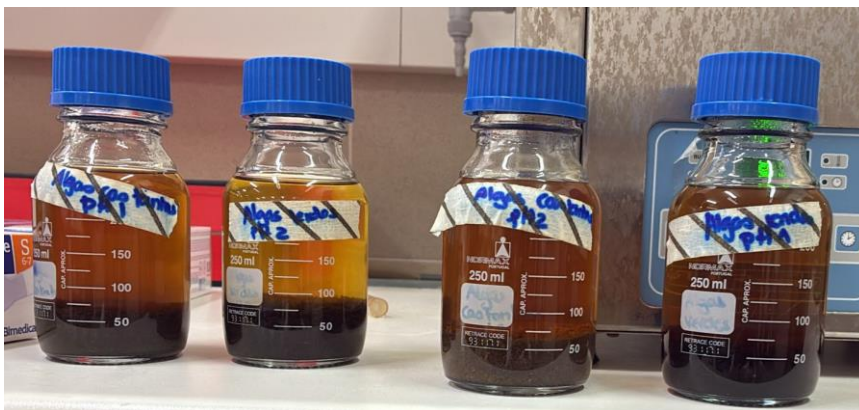


Fig.10 - Resultado da hidrólise térmica e química após 6 horas.

3.2 Filtragem

A mistura arrefeceu e foram separados os sólidos em suspensão no líquido rico em minerais. ⁽⁶⁾ Nesta fase foi feita também uma microfiltração com um filtro de 0.45 micrómetros, de modo a separar vestígios de alumínio e sílica que, aquando da precipitação de estruvite, contaminariam o produto final, sob a forma de, por exemplo moscovite ^(6,7). Esta fase do procedimento revela-se fulcral para o processo de extração de estruvite uma vez que a contaminação por moscovite é muito comum e deve ser evitada.

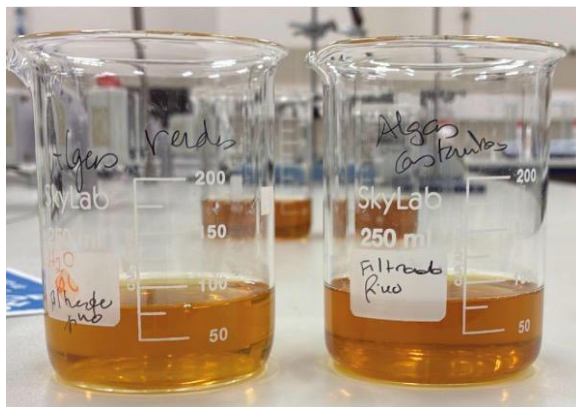


Fig. 11 – Solução obtida após a hidrólise e filtração.

3.3 Remoção seletiva de cálcio

Foi acrescentado, com uma conta gotas, NaOH de forma a subir o pH até 6. O ajuste com NaOH para pH 6.0 é feito para economizar reagentes e tornar o processo mais economicamente viável. Seguidamente o pH foi ajustado até 8 com carbonato de sódio. Nesta zona de pH o cálcio precipita sob a forma de CaCO_3 (2,5). O pH foi medido com um elétrodo submerso. O precipitado foi depois removido por filtração. Este passo impede que o cálcio, mais solúvel que o fosfato, a pH 9.0, onde o fosfato já é solúvel, forme fosfato de cálcio, consumindo o fosfato e impossibilitando a formação de estruvite. Embora tenha havido precipitação de carbonato de cálcio nas algas verdes, esta foi mais intensa na solução originada com as algas castanhas.



Fig.12 - Precipitação do carbonato de cálcio.

3.4 Precipitação da estruvite

Medimos a concentração de fosfato utilizando o método colorimétrico azul de molibdénio. Fizemos uma curva de calibração com os valores 3.0, 2.0, 1.0, 0.1, 0.01, 0.001 e 0.0005 mg/mL, tendo depois sido medidos os valores de absorbância de ambas a curva de calibração e a solução de algas com o dispositivo Synergy H1, tendo sido os valores obtidos e comparados com o programa Gen 5 v3.16. Os valores de absorbância foram obtidos com a utilização de luz com 880 nm de comprimento de onda. As amostras revelaram uma concentração média de fosfato de 1.73 mg/mL para as algas castanhas e 1,35mg/mL para as algas verdes.



Fig.13 – Preparativos para a obtenção da curva de calibração pelo método colorimétrico.

O pH foi elevado até a 9,0 utilizando NaOH e foi acrescentada uma solução de cloreto de magnésio em igual concentração à de fosfato, tendo sido testado o procedimento de precipitação com óxido de magnésio que não se revelou tão eficaz. A utilização do cloreto de magnésio foi mais eficaz, em detrimento do óxido de magnésio por duas razões principais: a utilização de cloreto de magnésio evita a adição de uma espécie estranha à solução, e porque a solubilidade do óxido de magnésio é menor, portanto não reagiria tão

intensamente com o fósforo. O pH 9.0 é essencial para evitar a formação de hidróxidos de magnésio (que não reagem com o amónio e fosfato) mas, simultaneamente, permitir a solubilização do fosfato, quem embora fosse mais solúvel a pHs superiores, não teria magnésio disponível em solução para reagir. A precipitação foi realizada em tubos de ensaio a agitação contínua de 200 rpm durante 30 minutos, que posteriormente foram mantidos num suporte de tubos de ensaio durante uma hora para sedimentar o precipitado.

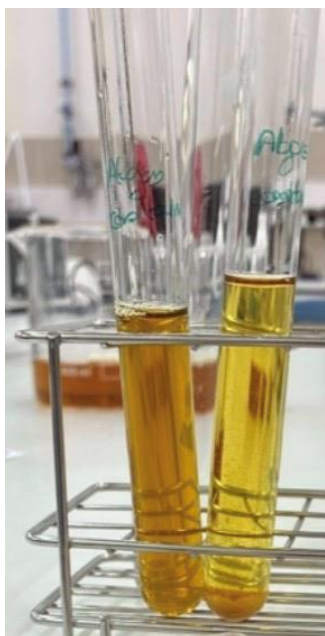


Fig.14 e 15 - Precipitado formado a partir de algas castanhas.



Fig.16 e 17 – Precipitado formado a partir de algas verdes.

3.5 Recuperação do precipitado

O líquido em excesso dos tubos de ensaio foi removido com uma pipeta o conteúdo dos mesmos foi vertido para tubos *Falcon*, que numa centrífugadora *Eppendorf Centrifuge 5810/ 5810 R*, foram centrifugados a 5000 rpm durante 30 minutos. O líquido foi removido e descartado e o sólido foi preservado num frigorífico a 5°C. Algumas amostras foram preservadas no líquido original, para estudar a composição do líquido futuramente.

No final deste processo realizamos um teste de validação - ao reacidificarmos o meio com um ácido fraco (pH 3.0), o sólido dissolveu-se parcialmente, zona de pH na qual a estruvite se dissolve. Tendo reprecipitado a pH 9.0, como seria de esperar na estruvite. É importante realçar que apenas uma pequena fração do sólido não se dissolveu, significando um grau de impureza relativamente baixo.



Fig.18 e 19 - Processo de centrifugação e resultado final.

4. Análise do precipitado

4.1 Métodos de análise

Para determinar o conteúdo do precipitado realizámos uma análise de observação com microscópio petrográfico, ideal para amostra minerais e, com o apoio da FCUP, realizamos uma análise de Microscopia Eletrónica de Varrimento (MEV). Resultados esses que foram verdadeiramente inspiradores, pois pudemos confirmar que deveremos estar no caminho certo.

As imagens obtidas através do microscópio petrográfico foram compatíveis com a bibliografia existente para imagens de cristais de estruvite encontrados em urina. É importante referir que a estruvite tem uma composição cristalográfica muito variável, mas os cristais formados estavam dentro dos padrões esperados.

Nos resultados associados à Microscopia Eletrónica de Varrimento (MEV) verificou-se que nas amostras correspondentes às algas castanhas a composição química obtida foi esperada, não tendo as algas verdes apresentado uma taxa de sucesso significativa comparativamente às castanhas. O nosso precipitado sólido

proveniente das algas castanhas evidenciava ser rico em magnésio, fósforo e amónio, à semelhança da composição química da estruvite ⁽⁶⁾.

As imagens obtidas por MEV evidenciaram que as partículas minerais estavam muito agregadas, o que não foi o ideal para a análise realizada. Numa análise futura foi-nos sugerido separar previamente as diferentes partículas sólidas e que, idealmente, deveríamos realizar uma análise de difração de raios-X. O que pretendemos realizar, com o apoio da FCUP.

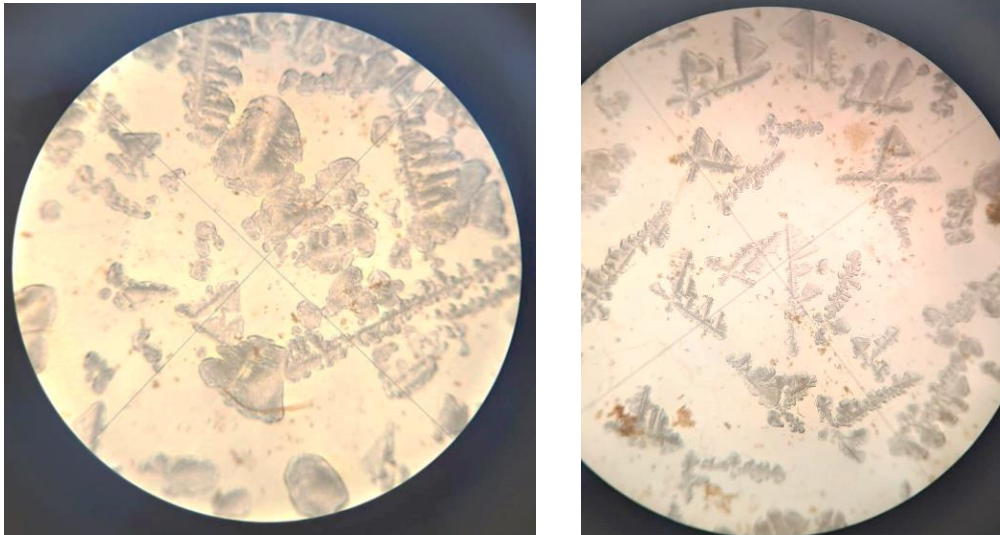


Fig.20 e 21 – Observação de cristais, compatíveis com as formas associadas à estruvite (Ampliação: 1000X)

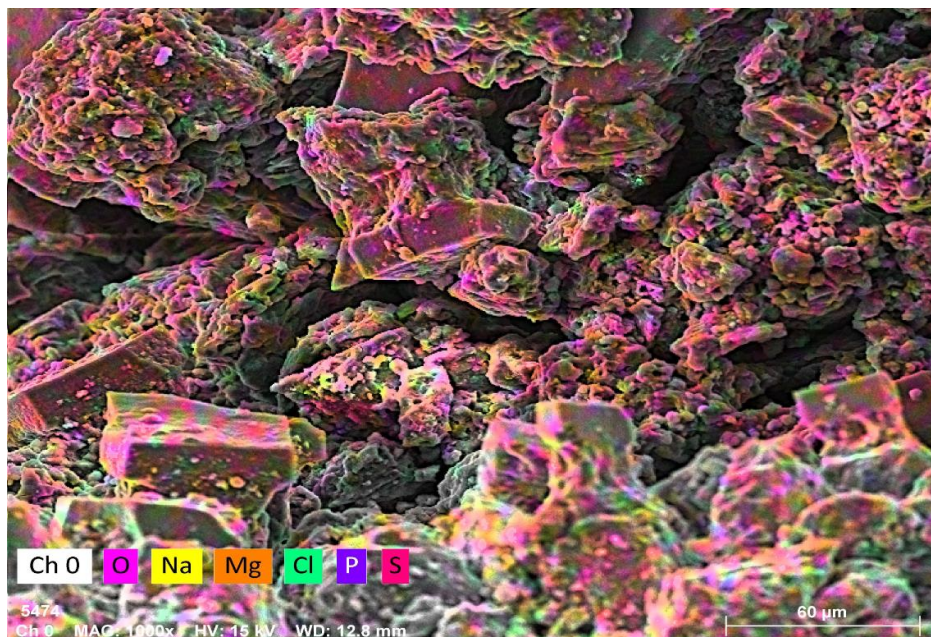


Fig.22 – Imagem obtida por MEV da amostra obtida a partir de algas castanhas.

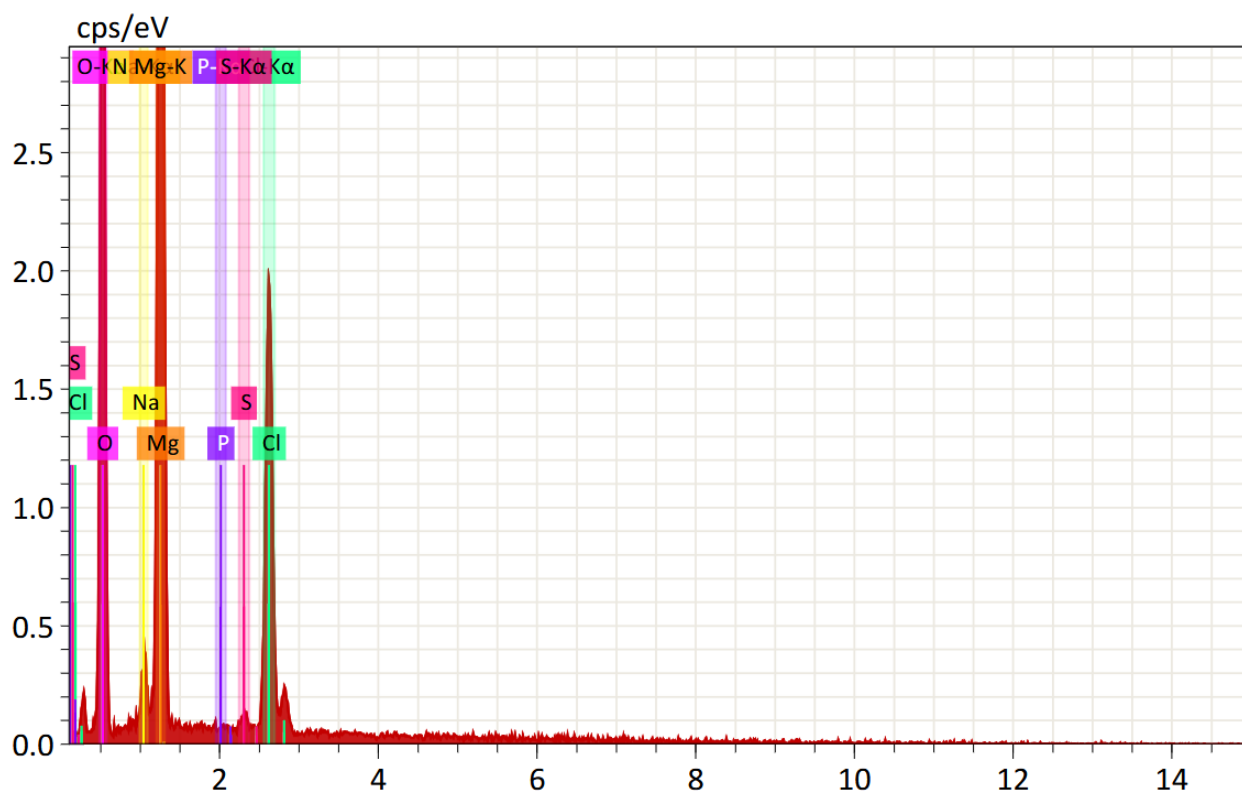


Fig.23 – Resultado obtido por MEV, identificando os elementos químicos presentes na amostra obtida a partir de algas castanhas.

4.2. Rendimento

Estimamos que cerca de 65% do precipitado formado seja estruvite. Esta estimativa foi realizada com base nos resultados da Microscopia Eletrônica de Varrimento, em que cerca de 65% dos segmentos analisados tinham a composição química compatível com a da estruvite. O restante conteúdo apresentava alguma contaminação por sódio e cloro e numa das amostras associadas à alga verde foi também detetada a presença de bário. Verificamos que este rendimento foi semelhante aos obtidos nos procedimentos realizados com microalgas com origem em efluentes, mas existem algumas vertentes nas quais o processo pode ser otimizado, como é o caso da hidrólise inicial e que, esperamos, poder otimizar futuramente.

5. Avaliação da viabilidade ambiental

A principal finalidade deste produto, no âmbito dos objetivos do presente projeto, consiste na libertação de estruvite em zonas florestais. Assim, considera-se fundamental avaliar se a exposição da flora a este composto poderá ter efeitos nocivos nos ecossistemas naturais.

Com este objetivo, foi realizado um ensaio com sementes de uma espécie modelo, a cevada (*Hordeum vulgare*). A escolha desta espécie baseou-se no facto de as suas sementes serem amplamente utilizadas em estudos laboratoriais de fitotoxicidade, devido à sua germinação rápida e uniforme e à sua elevada sensibilidade a determinados poluentes, como o chumbo, o cádmio e o alumínio. Estes contaminantes podem afetar negativamente o crescimento das plantas, a absorção de nutrientes e, consequentemente, a sua produtividade. Em condições favoráveis de humidade e temperatura, as sementes começam a germinar em cerca de 1 a 3 dias, podendo ocorrer emergência das plântulas em menos de uma semana.

No teste que realizamos dividimos 8 recipientes por 2 grupos. Os 4 recipientes do **grupo 1** serviram como dispositivos controlo e os 4 recipientes do **grupo 2** serviram como dispositivos experimentais. A sementeira foi realizada em tubos cilíndricos transparentes de plástico, sem orifícios, com 5,5 cm de altura e 3 cm de diâmetro. Em todos foi colocado um volume de solo até 2,5-3 cm de altura do tudo. Foi utilizado um substrato vegetal 100% sustentável, enriquecido com húmus e turfa e sem qualquer substância química adicionada (*Del-humus*).

As sementes do grupo 1 foram plantadas com a ajuda de uma pinça, tendo sido colocadas a cerca de 1 cm de profundidade da superfície do solo. As sementes do grupo 2 foram previamente colocado na solução final que continha o precipitado com estruvite, por 24 horas. De seguida, foram semeadas seguindo o mesmo procedimento do grupo 1. As sementes dos 8 recipientes foram plantadas em simultâneo e expostas às mesmas condições de luminosidade, temperatura e humidade. A rega foi realizada diariamente, pelas 8h da manhã, com a ajuda de 1 conta-gotas, tendo sido colocadas diariamente 4 gotas de água destilada.

Verificou-se que ocorreu germinação em todos os recipientes, não se tendo verificado diferenças significativas entre os dois grupos. Ao fim de 7 dias verificou-se a emergência de plântulas em todos os recipientes, tendo a menor plântula apresentado 1 cm de altura e a maior 12 cm de altura. No grupo 1 a média de alturas foi de 4,8 cm e no grupo 2 foi de 6,2 cm.

Apesar no número reduzido de réplicas de cada um dos grupos, devido à quantidade reduzida de precipitado obtido até à data, o facto de ter ocorrido germinação nos recipientes em que as sementes foram expostas à solução com precipitado é um indicativo favorável à libertação da estruvite obtida através do protocolo laboratorial apresentado neste trabalho. Os resultados revelaram que o precipitado e sua solução envolvente não são nocivas à germinação de *Hordeum vulgare*, uma vez que esta ocorreu naturalmente no grupo 2. De salientar ainda o facto dos espécimes do grupo 2 revelaram um crescimento, em média, ligeiramente superior em relação ao grupo de controlo (grupo 1). Estes resultados vão de acordo com o esperado uma vez que a estruvite também é utilizada como fertilizante de ação lenta, pelo que confirmamos a sustentabilidade deste procedimento, garantindo a sua viabilidade ambiental.

Em trabalhos futuros este ensaio deverá ser repetido com um maior número de dispositivos, de forma a potenciar a sua fiabilidade.



Fig. 24 e 25 – Germinação de sementes e crescimento de plântulas de *Hordeum vulgare* ao fim de 8 dias, no grupo 1 e no grupo 2, respetivamente.

6. Avaliação como retardante de combustão

Para avaliar as capacidades da estruvite como retardante de combustão foi utilizado o precipitado obtido diluído em 50 mL de água destilada, seguiu-se o procedimento experimental que a seguir se descreve e tendo como base a bibliografia consultada (^{13,14,15}).

Montaram-se dois dispositivos experimentais. Em cada um dos dois dispositivos colocaram-se 10g de material de origem vegetal combustível – plantas herbáceas de diversas espécies secas, colhidas de estratos inferiores de uma área verde urbana, e folhas secas de plátano (*Platanus hispanica*) caídas no junto às espécies herbáceas colhidas. O material combustível foi cortado em porções mais pequenas, pesado em balança eletrónica e colocou-se cada porção de 10g no interior de cada um dos almofarizes utilizados para o ensaio. Este material foi recolhido com algumas semanas de antecedência antes da realização dos ensaios, mas de forma a garantir a ausência de água, na véspera foram colocados numa estufa a 60°C, durante uma hora.

De seguida mediu-se 50 mL de água destilada com a ajuda de um gobelé. Pesou-se 0,3g de precipitado que foi adicionado à água destilada, agitou-se a solução com a ajuda de uma vareta de vidro e, de seguida, colocou-se a solução no interior do pulverizador. Previamente já tinha sido colocado 50 mL de água destilada no interior de outro pulverizador.

Os dois almofarizes, com material vegetal combustível no seu interior, foram colocados no interior de uma *hotte* onde previamente se tinha colocado uma escala (faixas intercaladas com 1 cm de espessura) que poderia eventualmente ser útil para a avaliar a altura da chama em cada um dos recipientes. Foi utilizado um isqueiro para iniciar a combustão, tendo mantido a chama por 10 segundos.

Começou-se por realizar o teste no almofariz sujeito a 4 pulverizações de água destilada. Tendo-se verificado a ocorrência de pequenas chamas com 1 a 2 cm de altura e, num determinado momento, observaram-se chamas com 6 cm de altura. A combustão finalizou ao fim de 6 minutos com uma elevada destruição (queima) do material combustível.



Fig. 26 – Resultado do 1.º ensaio (recipiente sujeito a pulverizações apenas com água).

De seguida, repetiu-se o procedimento com o almofariz que foi sujeito a 4 pulverizações com a solução de água destilada com precipitado contendo estruvite. Os resultados obtidos foram realmente surpreendentes, uma vez que apenas se observaram chamas com 1 a 2 cm de altura, a combustão finalizou ao fim de 4 minutos e 34 segundos e observou-se uma menor queima do material combustível.



Fig. 27 e 28 – Resultados do 1.º ensaio (A. Pulverização apenas com água; B. Pulverização com solução de água e precipitado contendo estruvite).

Após a realização deste ensaio questionamos a fiabilidade dos resultados, uma vez que nos pareceu que o material combustível sujeito à pulverização de água com estruvite tinha uma maior quantidade de folhas de plátano do que plantas herbáceas, comparativamente ao outro dispositivo experimental (controlo). Este facto poderia ter influenciado os resultados, uma vez que a resistência das espécies ao fogo é distinta. Uma vez, que ainda existia solução de pulverização de água com estruvite, optou-se por repetir o ensaio apenas com 5g de plantas herbáceas. Decidiu-se também substituir o isqueiro por um fósforo (que foi deixado no interior do

recipiente) de forma a garantir uma maior fiabilidade, uma vez que no primeiro ensaio a chama também não nos pareceu igual nos dois recipientes.

Os resultados deste segundo ensaio evidenciaram algumas diferenças quanto à pulverização com diferentes produtos. No recipiente pulverizado apenas com água, a combustão foi mais prolongada (1m34s) e observou-se a formação de chamas com 1 a 2 cm de altura; no recipiente pulverizado com a solução de água com precipitado de estruvite a combustão finalizou mais rapidamente (1m17s), mas a altura máxima atingida pelas chamas foi também de 1 a 2 cm. O grau de destruição do material combustível vegetal, após a análise da totalidade do material, pareceu ser muito semelhante nos dois recipientes, embora com um pouco mais de destruição no recipiente que não foi sujeito à presença de estruvite.

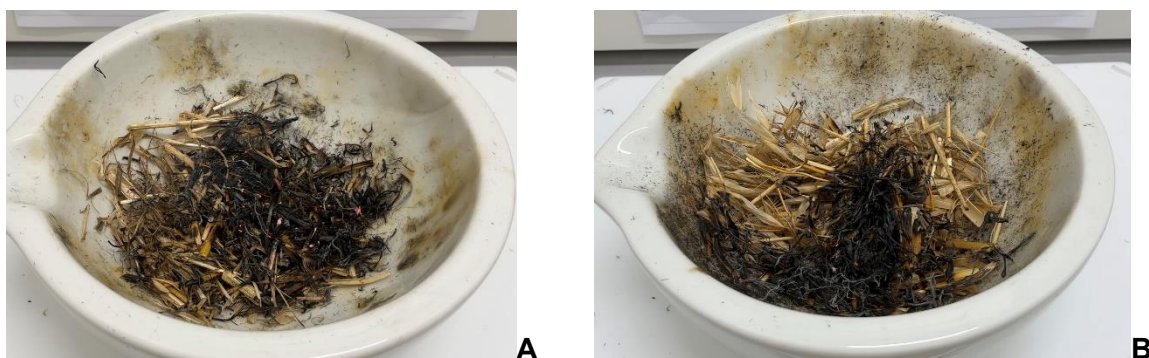


Fig. 29 e 30 – Resultados do 1.º ensaio (A. Pulverização apenas com água; B. Pulverização com solução de água e precipitado contendo estruvite).



Fig. 31 e 32 – Pesagem do material combustível vegetal para os dois ensaios realizados.

Após a realização destes ensaios verificamos que obtivemos resultados concordantes com o que esperávamos, no entanto, reconhecemos que serão necessários mais ensaios no futuro de forma a aumentar a fiabilidade das nossas conclusões.

7. Viabilidade económica

Através da utilização de 10 mL de solução de algas com adição de magnésio em igual concentração à de fósforo foi possível a obtenção de 0,486 g de precipitado. Realizamos a estimativa de custo deste produto a duas escalas, laboratorial e industrial. O nosso produto, numa possível escala industrial, apresenta um preço competitivo em relação a outros produtos que atualmente existem no mercado e que são nocivos, do ponto de vista ambiental. Numa escala laboratorial a utilização do agente retardante de incêndio com origem em biomassa algácea é mais dispendiosa do que os produtos tradicionais. Para fazer esta estimativa baseamos-nos exclusivamente nos custos dos reagentes utilizando preços médios disponibilizados pelo governo norte americano ⁽¹²⁾, mas existem outros custos associados a questões energéticas, consumo de água e recursos humanos. É importante notar que qualquer produção em elevada escala requer um investimento inicial relativamente significativo em equipamento, como uma autoclave industrial, balanças, estufas e tanques.

Neste estudo utilizamos, como guia, as quantidades que foram usadas nos ensaios laboratoriais que realizamos.

Escala laboratorial

Reagente e quantidade	Preço por 1 g de precipitado (€)
Cloreto de magnésio (1,27g)	0,0102
Ácido clorídrico (0,5mL)	0,0008
Hidróxido de sódio (0,3mL)	0,0005
Carbonato de sódio (0,05g)	0,0002
Preço total por grama de precipitado	Aproximadamente 0,013
Preço total por kg de precipitado	13

Tabela 1

Escala industrial

Reagente e quantidade	Preço por tonelada de precipitado. (€)
Cloreto de magnésio (1270kg)	764
Ácido clorídrico (500L)	150
Hidróxido de sódio (300L)	24
Carbonato de sódio (50kg)	30
Preço total por kg de precipitado	Aproximadamente 0,97

Tabela 2

Os produtos que atualmente são comercializados têm um custo médio de produção de 0,75€/kg, sendo o agente retardante o que se encontra associado ao produto com maior custo associado ⁽⁹⁾. Em contratos governamentais podem atingir os 1,50€/kg, mas em quantidades mais reduzidas para aplicação doméstica, como pacotes de 20 kg podem chegar a ser vendidos por valores superiores a 15€/kg, sendo um exemplo o *Komodo K-101 Perimeter Shield*, que é idealizado para aplicação doméstica, que representa um valor de venda de 66,5€/kg. Assim sendo, embora a utilização de estruvite como agente retardante de chama possa ser mais dispendiosa, ainda permitirá uma elevada margem de lucro, apresentando a vantagem de ser uma alternativa ambientalmente mais sustentável.



Fig. 33 – Komodo K-101 Perimeter Shield.

Agradecimentos

O desenvolvimento deste projeto não teria sido possível sem o valioso contributo das parcerias que estabelecemos ao longo deste percurso.

Numa fase inicial, contámos com o apoio da Doutora Isabel Costa (CiiMAR, Universidade do Porto, Laboratório de Diversidade Costeira), que nos forneceu informações científicas fundamentais sobre as algas. A sua orientação permitiu-nos compreender quais as principais espécies autóctones frequentemente associadas a *blooms* algais, identificar espécies invasoras presentes em Portugal, conhecer técnicas adequadas de recolha que minimizam o impacto nos ecossistemas e aprofundar conhecimentos sobre semelhanças e diferenças na composição química dos diferentes grupos de algas.

Posteriormente, gostaríamos de destacar o extraordinário contributo do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, em particular do grupo de investigação coordenado pela Doutora Goreti Sales (BioMark). A equipa constituída pela Doutora Ana Rita Cardoso, Doutora Liliana Carneiro e Doutora Manuela Frasco, recebeu-nos nos seus laboratórios, possibilitando a realização dos procedimentos experimentais que conduziram à obtenção de estruvite. O seu apoio foi incansável na otimização do protocolo laboratorial, bem como, na superação dos desafios encontrados ao longo do processo, motivando-nos a prosseguir mesmo perante as dificuldades.

Por fim, contamos com o apoio da equipa da Doutora Helena Sant'Ovaia, nomeadamente a Doutora Cândida Neto e a Doutora Joana Ferreira, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, que tornaram possível a realização de análises laboratoriais essenciais para confirmar a presença de estruvite no precipitado obtido.

A todas as investigadoras, expressamos o nosso mais sincero agradecimento pela sua disponibilidade, dedicação, apoio científico e confiança demonstrados ao longo deste percurso.

Referências bibliográficas

1. A. A. Ahmad (2012). *Release and recovery of phosphorus from wastewater treatment sludge via struvite precipitation*. Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Química e Ambiental, Universidade Putra Malaysia, Serdang.
2. Capdevielle, A., et al. (2012). "Optimization of struvite precipitation in real pharmaceutical wastewater - Determination of the optimal process parameters. *Journal of hazardous materials*. 244-245C. 357-369.
- 6Lopes, A. C. S. A., et al. (2024). *Síntese de estruvita a partir de biomassa algácea hidrolisada pelas vias térmica e química alcalina*. Revista DAE, São Paulo. Vol. 72, n.º 245, pp 01-16.
3. Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). *Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems*. *Science*, 321(5891), 926–929.
4. Hanhoun, Mary & Montastruc, Ludovic & Azzaro-Pantel, Catherine & Biscans, Béatrice & Frèche, Michèle & Pibouleau, Luc. (2011). *Temperature impact assessment on struvite solubility product: A thermodynamic modeling approach*. *Chemical Engineering Journal*. 167. 50-58
5. Hao, X., Wang, C., Lan, L., & van Loosdrecht, M. C. M. (2009). *Struvite formation, analytical methods and effects of pH and Ca²⁺*. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 59. 1077-83. 10.2166/wst.2008.557.
6. Lopes, A. C. S. A., et al. (2024). *Síntese de estruvita a partir de biomassa algácea hidrolisada pelas vias térmica e química alcalina*. Revista DAE, São Paulo. Vol. 72, n.º 245, pp 01-16.
7. Münch, E. V., & Barr, K. (2001). *Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams*. *Water Research, Volume 35, Issue 1*, pp. 151-159.
8. Pereira, L. (2025). *Illustrated Guide to the Main Macroalgae of the Portuguese Continental Atlantic Coast*. *Encyclopedia 2025*, 5, 176
9. Perimeter Solutions, S.A. (2025). *Form 10-K Annual Report for the fiscal year ended December 31, 2024*. U.S. Securities and Exchange Commission.
10. Raun, W. R. (s.d.). *Phosphorus Solubility*. SOIL 5813, Oklahoma State University.
11. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. (2021). *Specification 5100-304d: Long-term retardant, wildland firefighting*. U.S. Department of Agriculture.
12. U.S. Geological Survey. (2026). *Mineral Commodity Summaries, 2026*

Referências bibliográficas – Testagem do Protótipo

13. Batista *et al.* Avaliação da eficiência de um retardante de longa duração, à base de polifosfato amônico, em queimas controladas em condições de laboratório. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 223-229, set. 2008.
14. Cerqueira, R. Avaliação dos retardantes de fogo *Firout*. Trabalho de Graduação em Engenharia Florestal. Universidade do Paraná. 2017.
15. Liang, Z.; Zhou, Z.; Sun, Y.; Huang, Y.; Guo, X.; Cai, G.; Wang, M.; Zhang, H. Desempenho de extinção de incêndio de pó cerâmico de estruvita quimicamente ligado com altas propriedades de absorção de calor e retardamento de chama. *Materials* 2022, 15, 8021.