



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE PLA+PÓ DE
CASCA DE OSTRA: UMA OPÇÃO BIODEGRADÁVEL**

RÔMULO AUGUSTO SOUZA LIMA

Foz do Iguaçu
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE PLA+PÓ DE CASCA
DE OSTRA: UMA OPÇÃO BIODEGRADÁVEL
PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO PESQUEIRO**

RÔMULO AUGUSTO SOUZA LIMA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de materiais.

Orientador: Prof. Dra. Gislaine Bezerra Pinto Ferreira

Foz do Iguaçu
2025

RÔMULO AUGUSTO SOUZA LIMA

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE PLA+PÓ DE CASCA DE OSTRAS: UMA OPÇÃO BIODEGRADÁVEL
PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO PESQUEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. Dr^a Gislaíne Bezerra Pinto Ferreira
UNILA

Prof^a. Dr^a Daiane Calheiro Evaldt
UNILA

Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior
UNILA

Foz do Iguaçu, 16 de dezembro de 2025.

À minha família, que sempre me incentivou nos estudos. Dedico este trabalho a vocês, pelo apoio incondicional durante minha graduação em Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, especialmente aos meus pais, Basileu Romulo de Paula Lima e Elissandra Dias de Souza. Todo o esforço e a energia que dedicaram para que eu chegasse até aqui, vencendo mais uma etapa da minha vida, motivam-me diariamente. O incentivo aos estudos que recebi ao longo de toda a minha trajetória evidencia o quanto foram honrosos os sacrifícios que vocês fizeram. Esta conquista não é só minha; é nossa.

Aos meus amigos inseparáveis, agradeço o apoio constante nos altos e baixos da graduação em Engenharia de Materiais. Aos meus colegas de curso, pelas trocas de conhecimento, companhia e especialmente ao Eng. André de Souza Gomes pelo apoio técnico durante o TCC.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Gislaíne Bezerra Pinto Ferreira, agradeço por confiar em meu esforço e pela dedicação incansável na condução deste trabalho. Agradeço pelas aulas e pelo apoio desde a época em que atuava como coordenadora. Seu exemplo será sempre uma inspiração para que eu continue na área de compósitos e inovações em materiais.

Aos técnicos da UNILA e do LabMaker, agradeço a atenção, respeito e paciência, por me ensinarem a operar os equipamentos e por estimularem novas ideias. Por último, mas não menos importante, a Deus, por me dar forças e não me deixar desistir quando mais precisei, diante da solidão e da depressão, e por me proteger, junto do anjo que me guarda, das tentações.

*Os nossos pais amam-nos porque somos
seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos
de sucesso, isso pode parecer irrelevante,
mas nas ocasiões de fracasso,
oferecem um consolo e uma segurança
que não se encontram em qualquer outro lugar.*

Bertrand Russell

RESUMO

Este estudo verificou a viabilidade de produção de um compósito verde à base de ácido polilático (PLA) reforçado com pó de casca de ostra, caracterizando sua microestrutura e propriedades mecânicas por meio de técnicas convencionais de moldagem e análise. O objetivo geral consistiu em produzir o compósito via moldagem por injeção manual e avaliar sua morfologia superficial e rigidez elástica, enquanto os objetivos específicos envolveram a preparação do reforço para otimizar a interface matriz-partícula, a comparação de propriedades mecânicas entre PLA virgem e reforçado. Foi realizada caracterização inicial por MEV e medição do módulo de elasticidade dinâmico por excitação por impulso. Os resultados em comparação com a literatura foram diferentes, comprovando a inviabilidade de um processamento manual sem controle de parâmetros. Porém, a análise microscópica valida o uso de resíduos de ostra como um reforço sustentável.

Palavras-chave: biomaterial; compósito; compósito verde; moldagem manual; pó de casca da ostra;

ABSTRACT

This study assessed the feasibility of producing a green composite based on polylactic acid (PLA) reinforced with oyster shell powder, characterizing its microstructure and mechanical properties through conventional molding and analysis techniques. The general objective was to produce the composite via manual injection molding and evaluate its surface morphology and elastic stiffness, while the specific objectives involved preparing the reinforcement to optimize the matrix-particle interface and comparing mechanical properties between virgin and reinforced PLA. Initial characterization was performed using SEM and measurement of the dynamic elastic modulus via impulse excitation. The results, when compared to the literature, differed, confirming the unfeasibility of manual processing without parameter control. However, microscopic analysis validates the use of oyster shell waste as a sustainable reinforcement.

Keywords: biomaterial; composite; green composite; manual molding; oyster shell powder;

RESUMEN

Este estudio verificó la viabilidad de producción de un compuesto verde a base de ácido poliláctico (PLA) reforzado con polvo de cáscara de ostra, caracterizando su microestructura y propiedades mecánicas mediante técnicas convencionales de moldeo y análisis. El objetivo general consistió en producir el compuesto vía moldeo por inyección manual y evaluar su morfología superficial y rigidez elástica, mientras que los objetivos específicos involucraron la preparación del refuerzo para optimizar la interfaz matriz-partícula, y la comparación de propiedades mecánicas entre PLA virgen y reforzado. Se realizó caracterización inicial por MEV y medición del módulo de elasticidad dinámico por excitación por impulso. Los resultados, en comparación con la literatura, fueron diferentes, comprobando la inviabilidad de un procesamiento manual sin control de parámetros. Sin embargo, el análisis microscópico valida el uso de residuos de ostra como un refuerzo sostenible.

Palabras clave: biomaterial; compuesto; compuesto verde; moldeo manual; polvo de cáscara de ostra;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Equação da reação de obtenção do PLA.....	19
Figura 2 – Equação fundamental da calcinação.....	21
Figura 3 – PLA utilizado.....	25
Figura 4 – Casca de ostra	25
Figura 5 – Fluxograma das etapas do trabalho	27
Figura 6 – Jarro de bolas.....	28
Figura 7 – Mistura de casca de ostra com água após moagem	29
Figura 8 – Mufla.....	29
Figura 9 – Cadinho transbordado pelo material.....	30
Figura 10 – Peneiras utilizadas no processo de análise granulométrica	31
Figura 11 – Distribuição de partículas da amostra analisada	32
Figura 12 – Amostras separadas por granulometria	33
Figura 13 – Microscópio eletrônico de varredura.....	35
Figura 14 – Equipamento SC7620 Quorum.....	36
Figura 15 – Aquecedor por indução térmica	38
Figura 16 – Máquina injetora manual	38
Figura 17 – Molde com amostra recém produzida	39
Figura 18 – Corpos de prova tipo “halteres”	39
Figura 19 – Molde para produzir disco como corpo de prova.....	41
Figura 20 – Amostras de discos	42
Figura 21 – Sistema Sonelastic®	42
Figura 22 – Curva granulométrica antes e depois da moagem	43
Figura 23 – Amostras do MEV	45
Figura 24 – Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{CaCO}_3\text{--CaO--CO}_2$ em função da temperatura e da pressão parcial de CO_2	51
Figura 25 – Amostras (PLA virgem e o Compósito) do MEV	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa do material de partida	26
Tabela 2 – Distribuição granulométrica e mássica da casca de ostra.....	33
Tabela 3 – Distribuição de massa para a mistura	37
Tabela 4 – Dimensões dos corpos de prova (discos)	41
Tabela 5 – Média e desvio padrão do módulo de elasticidade das amostras	58

SUMÁRIO

1 Introdução.....	12
1.1 Objetivo geral.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2 Revisão bibliográfica.....	14
2.1 Compósitos.....	14
2.2 Compósito de matriz polimérica - CMP.....	15
2.2.1 CMP reforçados com partículas.....	17
2.3 Compósitos verdes.....	18
2.4 Ácido polilático (pla).....	18
2.5 Pó da casca de ostra.....	20
2.6 Compósitos pla + Pó da casca de ostra.....	21
3 Materiais e métodos.....	25
3.1 Moagem da casca de ostra.....	27
3.2 Secagem e peneiramento da casca de ostra.....	28
3.3 Seleção das frações granulométricas para preparo das amostras.....	34
3.4 Calcinação da casca de ostra.....	34
3.5 Caracterização de materiais de partida.....	34
3.5.1 Microscopia eletrônica de varredura.....	34
3.5 Moldagem dos corpos de prova.....	37
3.5.1. Moldagem dos corpos de prova para ensaio de tração.....	37
3.5.2. Moldagem dos corpos de prova para ensaio no sistema sonelastic®.....	40
4 Resultados.....	43
4.2 Análise microscopia de varredura – mev.....	44
4.1.1 Análise do pó da casca de ostra.....	44
4.1.2 Análise do corpo de prova tipo “haltere”.....	51
4.3 Análise Sonelastic®.....	58
5 Considerações finais.....	61
6 Referências.....	63

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tem emergido como um conceito central nas discussões globais, refletindo a necessidade de práticas que equilibrem o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental e a igualdade social. Este tema abordado na Engenharia de Materiais, busca a criação e o uso de materiais que minimizem a poluição e o impacto ambiental, promovendo ciclos de vida mais longos e eficientes dos materiais. Essa abordagem é essencial, dado o papel fundamental que os materiais desempenham em quase todas as indústrias, desde a construção civil até a indústria eletrônica (O que são eletrônicos sustentáveis?, 2025).

No entanto, a implementação de materiais sustentáveis enfrenta vários desafios e limitações. Entre os principais desafios estão a viabilidade econômica, a adequação técnica e a aceitação no mercado. Os Biomateriais, por exemplo, muitas vezes competem com materiais tradicionais não sustentáveis em termos de custo, desempenho e disponibilidade. Além disso, há desafios tecnológicos relacionados à escalabilidade e à qualidade dos materiais sustentáveis na indústria, que podem limitar sua produção em larga escala (BIOMATERIAIS: a inovação sustentável para o futuro dos materiais, 2025).

No setor de embalagens, as blendas polihidroxibutirato/poliácido láctico (PHB/PLA) demonstram ótimas aplicações para produção de filmes finos e os polihidroxialcanoatos (PHAs) para frascos de xampu, sacolas plásticas e produtos de higiene (PACHEKOSKI, W. M.; 2014).

Na agricultura, os biomateriais podem ser empregados como filmes mulching no solo para cobertura de cultivo de hortaliças. Proporcionando ao solo retenção de umidade, controle de ervas daninhas e proteção de folhas e frutos (OEKO BIOPLÁSTICOS, 2025).

Neste contexto, o uso de pó de casca de ostra como reforço em compósitos de poliácido polilático (PLA) se apresenta como uma alternativa promissora. Este trabalho sugere uma opção a destinação de resíduos orgânicos e podendo haver uma melhora na performance do biomaterial. A introdução de resíduos, como o pó de casca de ostra, na cadeia produtiva de materiais poliméricos pode reduzir custos, melhorar propriedades mecânicas e aumentar a sustentabilidade geral do produto.

O estado da arte para compósitos de PLA reforçados com pó de casca de ostra demonstra viabilidade técnica e significativo potencial sustentável para valorização de resíduos pesqueiros (Gigante et al., 2020; Liu et al., 2022; Hamester et al., 2012). As cascas

de ostra, compostas predominantemente por carbonato de cálcio biogênico, atuam como reforço efetivo e agente nucleante em matrizes de PLA, promovendo melhorias nas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira. A incorporação de 10 a 15% em massa de pó de casca de ostra representa a concentração ótima, equilibrando desempenho mecânico e processabilidade (GIGANTE, V. et al; 2020).

Do ponto de vista ambiental, a utilização de resíduos de casca de ostra em compósitos biodegradáveis oferece duplo benefício: mitigação do acúmulo de resíduos provenientes da aquicultura e substituição de plásticos convencionais (Zhan et al., 2022; Morris et al., 2019). Análises de ciclo de vida confirmam reduções significativas nos impactos ambientais (Alvarenga et al., 2012; Jeon et al., 2020), embora a viabilidade econômica permaneça sensível à logística de coleta e ao processamento dos resíduos (Alvarenga et al., 2012; SYMBIOMA Project, 2021).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é propor a produção de um compósito verde a base de PLA reforçado com pó da casca de ostra.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste trabalho temos:

- Produzir o compósito PLA reforçado com a casca de ostra;
- Preparar o reforço visando boas propriedades interfaciais por FTIR e MEV;
- Comparar propriedades mecânicas, realizando medidas de módulo de elasticidade entre o PLA virgem e o PLA reforçado;
- Avaliar a microestrutura da superfície de fratura do PLA virgem e do PLA reforçado através de micrografia eletrônica de varredura;
- Verificar a viabilidade de produzir compósitos de forma convencional por extrusão e injeção manual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS

De acordo com Callister (2012), os compósitos são uma grande classe de materiais de extrema relevância na engenharia de materiais, caracterizando-se pela união de duas ou mais fases distintas, onde uma delas atua como matriz e a outra como reforço, resultando em propriedades que superam aquelas de seus constituintes individuais. Neste caso, é fundamental compreender que a seleção adequada dos componentes e o controle preciso dos processos de fabricação determinarão seu desempenho mecânico, como leveza, durabilidade e resistência mecânica, seu desempenho térmico e/ou ambiental, abrindo possibilidades para aplicações inovadoras em setores como aeroespacial, automotivo e biomédico.

As estruturas compósitas, podem apresentar diferentes classificações baseadas em aspectos como tamanho, forma e distribuição do reforço, bem como o tipo de matriz. Apresentam uma elevada relação resistência/peso, resistência à corrosão e a impactos, além de possibilitar mais junções de funcionalidades adicionais como a condução de calor ou a absorção de energia, o que as torna alternativas atrativas para soluções sustentáveis e de alto desempenho (Callister, 2012).

Além de todas as propriedades favoráveis para produção, a evolução dos métodos de processamento, como a moldagem por injeção, compressão e deposição aditiva, associada à modelagem computacional avançada, permite uma otimização contínua dos sistemas compósitos, equilibrando custo, eficiência e sustentabilidade (Callister, 2012).

Os compósitos podem ser classificados a partir de diversos critérios, como o tipo de material da matriz que classifica como compósitos de matriz polimérica, cerâmica

e metálica. Também são classificados quanto ao tipo de reforço utilizado, podendo ser fibras, partículas ou laminados. Outras classificações importantes são em relação a orientação e distribuição dos reforços que oferecem variações na estrutura, reduz as deficiências e otimiza as características do material. Essa diversidade de classificações é essencial para a seleção dos materiais em projetos de engenharia, permitindo a customização de propriedades, o que reforça a importância de uma abordagem multidisciplinar no estudo dos compósitos, incluindo conceitos de ciência dos materiais, mecânica dos materiais e processos de manufatura (MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, Rees D., 1999).

2.2 COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA - CMP

Os compósitos de matriz polimérica possuem uma estrutura complexa, versátil e uma grande capacidade de combinar as propriedades intrínsecas dos polímeros com os benefícios de ser mais econômico, de fácil processamento e de se adaptar facilmente com reforçadores, como fibras de vidro, carbono ou até mesmo materiais naturais, resultando em uma melhoria significativa no desempenho mecânico, térmico e, por vezes, na resistência à corrosão em comparação com os polímeros isolados. Apesar de apresentar boas propriedades, alguns solventes e uma longa exposição à luz ultravioleta causam degradação em suas propriedades, assim como, possuir um limite de uso de temperaturas mais baixo, menor módulo de Young e menos resistência mecânica (CHAWLA, 2019).

Esses compósitos podem ser formulados utilizando matrizes termofixas, onde são processados através de reações químicas, proporcionando uma rede tridimensional robusta com uma elevada resistência mecânica, térmica e química. Já os compósitos feitos a partir de matrizes termoplásticas, oferecem maior reciclabilidade e

processabilidade, permitindo moldagens sem a perda de propriedades específicas e ampliando as possibilidades de aplicação. Em suma, a escolha entre uma matriz termofixa e uma termoplástica depende de qual será a função específica da aplicação, como temperatura de uso, exigências mecânicas e a viabilidade de reciclagem, com cada tipo de matriz oferecendo vantagens e desvantagens próprias, conforme detalhado por Chawla.

A interação entre a matriz e o reforçador assume um elo fundamental para a transferência de energia, sendo geralmente a matriz mais dúctil e o reforço mais resistente e rígido. Além disso, a qualidade da interface é influenciada pelas técnicas de tratamento superficial e a escolha de aditivos, determina a eficiência na transferência de cargas e a durabilidade sob condições críticas de serviço. Através dessa abordagem, Chawla (2019) enfatiza que um compósito não é simplesmente a soma de suas partes, mas um sistema complexo onde a sinergia entre seus componentes é fundamental para ganhar as propriedades desejadas.

Ademais, os processos de fabricação, que podem variar de acordo com a matriz polimérica, desde práticas como a moldagem manual (hand lay-up), moldagem a vácuo (vacuum bag), infusão de resina, moldagem por transferência de resina (RTM), pultrusão, enrolamento filamentar e deposição automatizada de fibras/fitas (AFP/ATL), para matrizes poliméricas termofixas. Entretanto, para matrizes poliméricas termoplásticas é possível utilizar alguns processos como moldagem por compressão e injeção, termoformagem e soldagem. O controle de parâmetros durante o processamento assegura a qualidade e o desempenho final do produto, estes parâmetros podem ser delimitados como a forma do reforço, geometria da peça desejada, volume da produção e o desempenho desejado (Surahman & Rohman, 2016).

2.2.1 CMP REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com partículas (CMPPs) representam uma classe importante de materiais avançados que combinam as propriedades de uma matriz polimérica com as características estruturais e funcionais de partículas de reforço. Esses materiais oferecem vantagens significativas em comparação aos polímeros não reforçados, incluindo maior rigidez, resistência mecânica aprimorada, estabilidade térmica elevada e propriedades multifuncionais (Okpala; Udu; Egwagu, 2025).

Diferentemente dos compósitos reforçados com fibras, onde o reforço é principalmente unidirecional, os CMPPs oferecem propriedades isotrópicas devido à orientação aleatória das partículas, facilitando sua aplicação em geometrias complexas. A função da matriz polimérica é manter as partículas em posição, distribuir uniformemente as cargas e transferir tensões entre os elementos de reforço (Fu, 2008).

A eficácia do reforço em CMPPs depende da qualidade da interface matriz-partícula. Interfaces com boa aderência permitem transferência eficiente de tensões da matriz para as partículas, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas. A adesão interfacial pode ser quantificada através de técnicas de caracterização como microscopia de força atômica (AFM), espectroscopia de correlação cruzada e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (Wetzel et al., 2000).

Em relação ao tamanho das partículas, partículas nanométricas oferecem maior área superficial específica (Fu, 2008), proporcionando maior densidade de interfaces e maior potencial de reforço. Para uma partícula ser considerada "nano", são necessárias ter diâmetros inferiores a 100 nm.

A dispersão homogênea das partículas na matriz é essencial para otimizar as propriedades dos compósitos. Aglomeração de partículas resulta em concentrações de tensão e redução da eficiência do reforço. Técnicas de processamento como mistura em

estado fundido, assistida por solvente e polimerização in situ são empregadas para alcançar dispersões adequadas (Fu, 2008).

2.3 COMPÓSITOS VERDES

Os compósitos verdes, também conhecidos como biocompósitos ou eco-compósitos, são caracterizados pela utilização de recursos renováveis em sua composição. A distinção fundamental entre compósitos verde e convencionais é definida pelo ciclo de vida dos materiais. Enquanto os compósitos sintéticos dependem de recursos não renováveis e apresentam baixa biodegradabilidade, os compósitos verdes utilizam matérias-primas renováveis e oferecem opções de final de vida mais sustentáveis, incluindo biodegradabilidade e compostagem (Atul, 2023; Mahapatra, 2024).

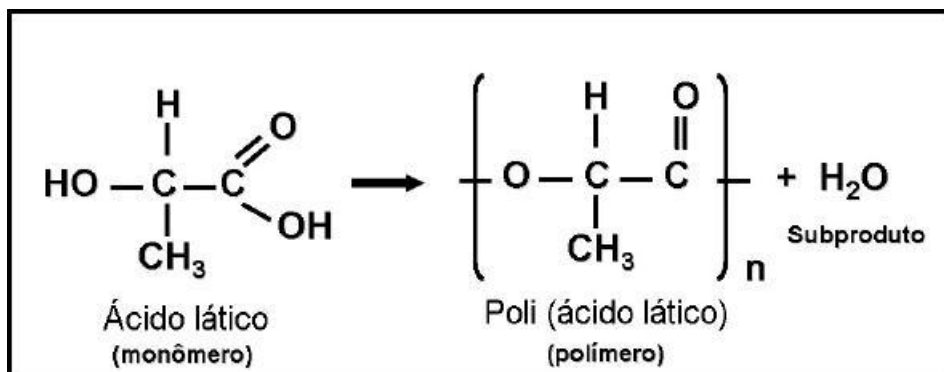
Os compósitos verdes representam uma revolução na ciência dos materiais, como alternativa sustentável aos compósitos convencionais baseados em materiais sintéticos. Definidos como materiais compósitos que utilizam partículas ou fibras naturais como reforço e/ou matrizes biopoliméricas biodegradáveis, os compósitos verdes combinam desempenho mecânico adequado com responsabilidade ambiental. Estes materiais surgiram em resposta às crescentes preocupações ambientais globais e à necessidade urgente de transição para uma economia circular. A motivação para o desenvolvimento de compósitos verde reside na necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, minimizar o impacto ambiental dos materiais e atender às demandas regulatórias crescentes por sustentabilidade (Mahapatra, 2024).

2.4 ÁCIDO POLILÁTICO (PLA)

O ácido polilático, também conhecido como PLA, é um polímero termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis, como milho ou cana-de-açúcar, muito utilizado na engenharia pela sua biocompatibilidade e propriedades mecânicas.

O PLA apresenta módulo de elasticidade de aproximadamente 3-4 GPa, com resistência à tração variando de 50-70 MPa, mas é limitado por sua fragilidade e baixa resistência térmica (temperatura de transição vítrea em torno de 60°C). A síntese ocorre via polimerização por abertura de anel do lactídeo, permitindo modificações como copolimerização para melhorar a tenacidade e a biodegradabilidade (SWETHA et al., 2023).

A figura 1 - Equação da reação de obtenção do PLA



Fonte: Rodrigues Coimbra, 2008.

Na manufatura aditiva, o PLA é utilizado para impressão 3D por deposição fundida (FDM), com avanços recentes em filamentos reforçados por metais (ex.: ferro ou bronze) que elevam a resistência flexural em 50-100%, ideais para protótipos mecânicos e dispositivos biomédicos. Pesquisas de 2025 exploram metais em PLA para estruturas com absorção de ondas de radar, melhorando rigidez sem comprometer a biodegradabilidade (SENGOTTAIYAN SIVALINGAM et al., 2025). Para aplicações mecânicas, biocompósitos PLA/fibras naturais, como bambu, aumentam o módulo de flexão para 7-8 GPa, com redução na absorção de água de 3% para 1,6%, facilitando uso em componentes automotivos e de construção (MOCHAMAD ASROFI et al., 2025).

Na medicina, o PLA pode ser empregado para regeneração óssea e tecidual, com modificações como adição de quitina melhorando a adesão celular e a taxa

de degradação controlada. Além disso, compósitos PLA/grafeno são usados em entrega de fármacos, onde a liberação sustentada é alcançada por degradação hidrolítica, com aplicações em implantes ortopédicos (YANG et al., 2024).

2.5 “ARAGONITA” – MATERIAL BIOGÊNICO

A maricultura representa um setor especializado da aquicultura, focado no cultivo de organismos aquáticos em ambientes marinhos, abrangendo espécies como peixes, moluscos, camarões e algas (Marinha do Brasil, 2025). O termo ostreicultura, por sua vez, refere-se especificamente ao manejo de ostras. No contexto brasileiro, essa atividade tem experimentado um crescimento acelerado, posicionando o país como o segundo maior produtor da América Latina (Marinha do Brasil, 2025). Em escala global, os líderes na produção são China, Peru, Japão, Índia e Estados Unidos, enquanto o Brasil figura na 27ª posição nesse ranking (FAO, 2024). A ostra, assim como outros moluscos, apresenta um corpo mole envolto por uma concha protetora. Essa concha é formada principalmente por carbonato de cálcio (CaCO_3), extraído da água salgada por meio de glândulas presentes no manto. Após processamento adequado, essas conchas encontram aplicações na agricultura e na indústria.

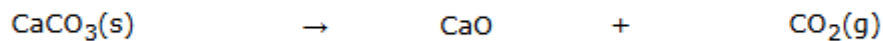
O carbonato de cálcio é empregado em diversos setores, como na produção de cerâmicas e como carga em polímeros, reforçando a estrutura de uma matriz, melhorando sua rigidez, dureza e resistência ao calor. As cascas de ostras servem como uma rica fonte natural de CaCO_3 , gerando volumes expressivos com baixa taxa de reciclagem (Conchas Brasil, 2023).

As cascas de ostras servem como uma rica fonte natural de CaCO_3 , gerando volumes expressivos com baixa taxa de reciclagem; elas já são aproveitadas na

indústria farmacêutica, mas seu uso em polímeros permanece limitado (Devilla, 2025).

Utilizando o processo térmico de calcinação no CaCO_3 , obtemos o óxido de cálcio. O óxido CaO , também chamado de “cal”, é um sólido branco pouco solúvel em água à temperatura ambiente e gera soluções com alta alcalinidade. A partir da figura 2, podemos observar a equação química para obtenção da cal.

Figura 2: Equação fundamental da calcinação.



Fonte: (Quevedo, R.T.; 2025)

A cal é utilizada em vários setores da indústria, cerca de 45% do calcário é utilizado na indústria siderúrgica, para a produção de aço, ferro e alumínio. Na saúde é usado em tratamentos de queimaduras e usado para controle de poluição, como lavadores de gases para reduzir emissões de dióxido de enxofre (Óxido de cálcio, 2023).

Estudos sobre o aproveitamento de conchas de ostras ainda são escassos, especialmente no Brasil, onde o cultivo desse molusco é uma prática relativamente nova (MENDONÇA et al., 2017). Na Coreia, desde o começo da década de 1980, cientistas investigam formas de reutilizar esses resíduos (COSTA et al., 2012). A abundância de cascas de ostras gerada representa um desafio ambiental significativo, e o governo local estimula iniciativas de pesquisa para desenvolver soluções práticas e sustentáveis.

2.6 COMPÓSITOS PLA + PÓ DA CASCA DE OSTRAS

Os compósitos de matriz polimérica são, basicamente, uma combinação

entre um polímero e um material de reforço. Normalmente, a matriz usada é um polímero termoplástico. E o PLA (Ácido Polilático) é um biopolímero que vem ganhando destaque por ser biodegradável e ter origem renovável (dois pontos muito valorizados hoje, especialmente quando falamos em sustentabilidade).

Já o pó da casca de ostra entra em cena como um reforço mineral: ela permite que o material fique mais resistente, melhora o desempenho térmico e facilita o processamento. Com isso, ainda reduz o custo final do compósito, ou seja, uma combinação inteligente entre desempenho e economia.

Estudos com PLA injetado demonstram melhorias em ganho de resistência mecânica e módulo de 10% a 15% de massa de CaCO_3 , e com 10% da massa uma boa estabilidade térmica (KRISHNUDU et al., 2024). Outro estudo, de PLA com CaCO_3 de casca de ovo, apontam 15% em massa como um teor “ótimo” para rigidez e propriedades mecânicas (DE ALMEIDA et al., 2016). Os melhores parâmetros que podem melhorar as propriedades do compósito são tamanhos, morfologia das partículas (DE ALMEIDA et al., 2016; GBADEYAN; LINGANISO; DEENADAYALU, 2022; ORISEKEH; CORTI; JAHAN, 2024.), tratamento de superfície/compatibilizante (ALIOTTA et al., 2019; PETCHWATTANA; NAKNAEN; NARUPAI, 2020) e o processo de fabricação (CREE; SOLEIMANI, 2023; KRISHNUDU et al., 2024; PAVON et al., 2022).

2.7 SISTEMA SONELASTIC

Este sistema é um captador acústico direcional que registra as vibrações emitidas pelo material durante sua vibração livre. O sinal acústico é então transmitido para um software especializado (Sonelastic), que processa os dados sonoros para identificar as frequências naturais de vibração e o fator de amortecimento do material. Com base nessas frequências, bem como nas massas e dimensões do corpo de prova (informadas

previamente ao software), o programa aplica equações específicas para determinar os módulos elásticos dinâmicos, incluindo o módulo de Young, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson, permitindo a caracterização da rigidez do material.

2.8 MECANISMO DE FRATURA EM POLÍMEROS COM FOCO EM PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO)

Uma das limitações do PLA puro é sua rigidez inerente. Diferentemente de polímeros como polietileno de alta densidade (PEAD) ou polipropileno (PP), que exibem comportamento dúctil, o PLA fratura de forma frágil com alongamento limitado (frequentemente inferior a 10% antes da ruptura (Nagarajan, 2016; Lin,2015)). Essa fragilidade limita severamente sua aplicação em contextos que exigem absorção de energia por deformação plástica, como impacto ou fadiga.

2.8.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE MECÂNICA DA FRATURA EM POLÍMEROS

A transição entre comportamento frágil e dúctil em polímeros é determinada por múltiplos fatores (FRIEDRICH K., 2016; GAO Z., 2003): Temperatura, Velocidade de deformação, Microestrutura e Presença de defeitos.

Abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g), o polímero comporta-se como um vidro frágil com mobilidade molecular reduzida. Acima de T_g , a mobilidade segmental aumenta, permitindo deformação plástica antes da ruptura.

Deformações rápidas favorecem fratura frágil, pois o material não tem tempo para reorganizar molecularmente. Deformações lentas permitem dissipação de energia através de deformação plástica.

A cristalinidade influencia significativamente o comportamento de fratura. Polímeros amorfos tendem a exibir maior ductilidade que suas contrapartes semicristalinas (a interfaces cristal-amorfo atuam como concentradores de tensão).

Vazios, microtrincas e heterogeneidades na distribuição de filler atuam como concentradores de tensão, reduzindo tenacidade e induzindo fratura frágil prematura.

2.8.2 MECANISMOS DE FRATURA FRÁGIL EM POLÍMEROS

Em polímeros frágeis (como PLA puro amorfizado por resfriamento rápido), a fratura ocorre com deformação plástica negligenciável. O mecanismo envolve (FRIEDRICH K., 2016):

- **Nucleação de crazes (craze initiation):** Sob tensão, iniciam-se microdeformações localizadas (crazes), que são regiões de volume expandido contendo filamentos orientados e vazios (GAO Z., 2003).
- **Propagação de crazes:** Os crazes propagam-se perpendicularmente à tensão principal máxima, formando banda de deformação que antecede a trinca.
- **Iniciação e propagação de trinca:** Quando um craze atinge tamanho crítico, uma trinca de verdade nuclea e propaga-se através da estrutura com velocidade governada por MFLE.
- **Fractografia:** A superfície de fratura exhibe aspectos morfológicos característicos vistos em microscopia eletrônica de varredura (MEV/SEM).

Os aspectos morfológicos são três zonas distintas, sendo elas a zona de espelho (região lisa próxima à origem de fratura), zona de névoa (região intermediária com rugosidade crescente) e zona áspera (região de máxima rugosidade distante à origem).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste estudo foram o ácido polilático (PLA) e o pó da casca de ostra. A tabela 1 abaixo mostra os materiais de partida, a origem e a massa inicial. O PLA foi produzido pela empresa Vulcano Labs Indústria e Comércio Ltda (Figura 3). A casca de ostra foi fornecida por uma fazenda aquícola situada no estado do Rio Grande do Norte (RN), mostrada na Figura 4.

Figura 3 – PLA utilizado



Figura 4 – Casca de ostra



Fonte: Do próprio autor.

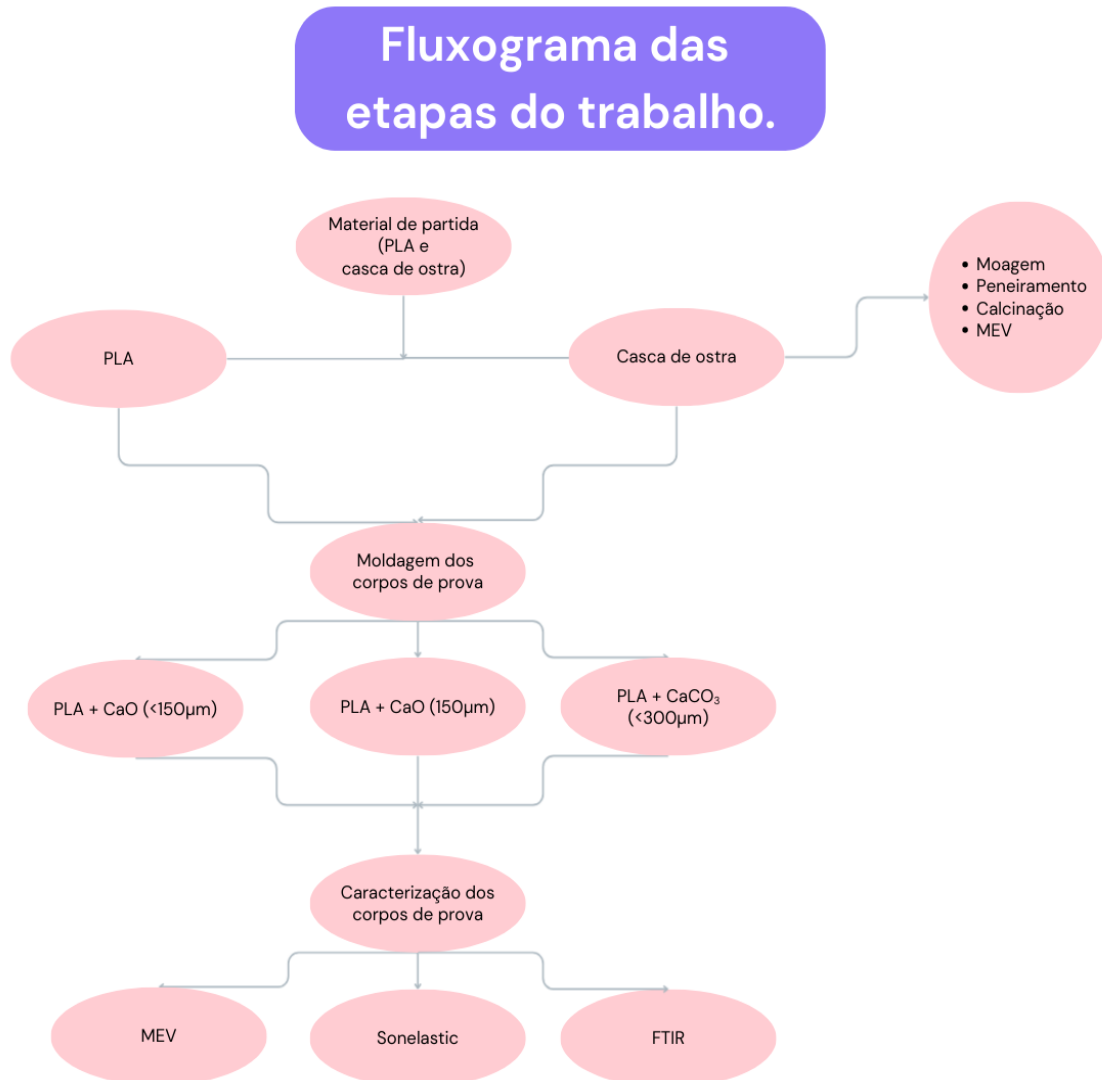
Tabela 1: Massa do material de partida.

Material	Origem	Massa
PLA	Vulcano Labs Indústria e Comércio Ltda	1000 g
Casca de ostra	Fazenda aquícola situada no estado do RN	277,8 g

Fonte: Arquivo pessoal.

As etapas realizadas neste trabalho estão escritas no fluxograma apresentado abaixo (Figura 5) e descritas detalhadamente nos próximos tópicos deste capítulo.

Figura 5: Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Próprio autor.

3.1 MOAGEM DA CASCA DE OSTRA

A casca de ostra foi moída em moinho de bolas com o objetivo de refinar os grãos e melhorar sua dispersão. O moinho de jarros empregado foi o modelo 070M002 da marca Matoli; de acordo com o site oficial da empresa, o equipamento atinge até 200 rpm no rolo de tração e possui dimensões (comprimento × largura × altura) de 750 × 650 ×

350 mm.

Na preparação da moagem, utilizou-se um jarro (Figura 6) com volume aproximado de 3 litros, contendo esferas de tamanhos distintos, com diâmetros médios de 20,5 mm e 12,5 mm, respectivamente.

Figura 6 – Jarro de bolas.



Fonte: Arquivo pessoal

Após a limpeza do jarro, foram adicionados 700 mL de água destilada, duas gotas de dispersante (silicato de sódio neutro) e a casca de ostra. O processo de moagem foi realizado por 21 horas, a uma rotação equivalente a 80% da capacidade máxima do moinho (~160 rpm).

3.2 SECAGEM E PENEIRAMENTO DA CASCA DE OSTRA

Com a conclusão da moagem, o material aquoso obtido (Figura 7) foi transferido para dois cadinhos de cerâmica e submetido a aquecimento em uma mufla

(Figura 8) a 300 °C.

Figura 7: Mistura de casca de ostra com água após moagem



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 8: Mufla



Fonte: Arquivo pessoal

No entanto, após 30 minutos de aquecimento, observou-se transbordamento do material devido à ebulição rápida da água, resultando em uma perda significativa do mesmo (Figura 9).

Figura 9 – Cadinho transbordado pelo material.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após análise visual, a temperatura da mufla foi ajustada de 300 °C para 115 °C, permitindo a secagem do material por 24 horas.

Após a secagem, a casca de ostra foi peneirada em um conjunto de peneiras metálicas com aberturas variando de 9,50 mm a 150 μ m (Figura 10). Após a separação granulométrica foram obtidas as frações mássicas mostradas na Figura 11.

Com a conclusão da secagem, realizou-se um segundo peneiramento para a granulometria final, verificando se a moagem de bolas (de baixa energia) promoveu a redução no tamanho dos grãos. As amostras foram pesadas e distribuídas em frascos de plástico (Figura 12) de acordo com suas respectivas faixas granulométricas.

Figura 10 – Peneiras utilizadas no processo de análise granulométrica



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 11 – Distribuição de partículas da amostra analisada



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 12: Amostras separadas por granulometria.



Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 2: Distribuição granulométrica e mássica da casca de ostra

Faixa de tamanho de partícul (μm)	Massa (g)	Granulometria (μm)	Massa (g)
<150	6,58	1200 < D < 2000	15,47
150 < D < 300	21,21	2000 < D < 2400	8,23
300 < D < 420	13,18	2400 < D < 4000	8,21
420 < D < 600	22,88		

600 < D < 1200	45,65		
----------------	-------	--	--

Fonte: Arquivo pessoal.

3.3 SELEÇÃO DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA PREPARO DAS AMOSTRAS

Com base na separação das amostras e considerando que partículas finas possuem maior área superficial, podendo aumentar a área de contato interfacial entre a matriz e o reforço, optou-se por selecionar as duas frações mais finas (com granulometria inferior a 150 μ m e entre 150 e 300 μ m) para realizar a calcinação (Fu, 2008).

Com o objetivo de verificar a influência da calcinação na interface matriz-reforço, também foram preparadas amostras com a casca de ostra com granulometria entre 300 e 420 μ m sem calcinação.

3.4 CALCINAÇÃO DA CASCA DE OSTRA

A calcinação foi realizada na mufla (figura 6) em uma isoterma de 850 °C por duas horas, seguido de resfriamento lento até o dia seguinte. Nesta etapa ocorre a liberação de CO₂ transformando o CaCO₃ em CaO.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE PARTIDA

Os materiais de partida foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o objetivo de verificar sua morfologia, bem como foi realizada análise química via EDS.

3.5.1 Microscopia eletrônica de varredura

As micrografias foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss EVO-MA10 (Figura 13), operando em tensão de 0,2 a 30 kV.

Para a realização da análise as amostras foram colocadas numa fita adesiva dupla face de carbono fixada num suporte (stub) seguido da deposição de ouro-paládio até uma espessura de 6-9nm, utilizando-se o equipamento SC7620 Quorum Mini Sputter Coater/Glow Discharge System (Figura 14).

Figura 13: Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 14: Equipamento SC7620 Quorum.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.5.1. Moldagem dos corpos de prova para ensaio de tração

Foram preparados quatro tipos de amostras, sendo uma de PLA puro (virgem), duas de PLA com diferentes granulometrias de CaO e uma amostra de PLA com CaCO₃.

Tanto o PLA (na forma de grânulos), como os pós de CaO e CaCO₃ foram pesados e separados em recipientes cerâmicos de acordo com a granulometria desejada, mantendo a proporção de 15% de CaO ou CaCO₃, conforme tabela abaixo.

TABELA 3: Distribuição de massa para a mistura.

MATERIAL	MASSA			
	PLA	CaO	CaCO ₃	Total
PLA VIRGEM	10 g	-	-	10 g
PLA + 15wt% <150 μm	10g	1,49 g	-	11,49 g
PLA + 15wt% de 150 μm até 300 μm	20g	3,03 g	-	23,03 g
PLA + 15wt% de 300 μm até 420 μm	20,06 g	-	2,99 g	23,05 g

Fonte: Arquivo pessoal.

Tanto a amostra de PLA puro como as amostras PLA + CaO e PLA + CaCO₃ foram preparadas da mesma forma, na qual cada uma delas foi aquecida até uma temperatura de aproximadamente 256°C com um aquecedor de indução térmico (Figura 15), possibilitando a fusão do PLA e a mistura manual dos pós de CaO e CaCO₃. A mistura foi realizada até que fosse obtida uma homogeneidade considerada aceitável e em seguida foram levadas a uma mini injetora manual de bancada portátil, com capacidade de

armazenamento de até 30 g e dimensões de 200×400×600 mm (Figura 16).

Figura 15 – Aquecedor por indução térmica.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 16 – Máquina injetora manual.



Fonte: Arquivo pessoal.

As misturas fundidas foram vazadas em um molde conforme a norma ASTM D638-10, seguindo a geometria padrão dos corpos de prova. A Figura 17 abaixo representa o molde com o corpo de prova de uma amostra de PLA virgem.

Figura 17 – Molde com amostra recém produzida.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 18: Corpos de prova tipo “halteres”



Fonte: Arquivo pessoal.

Foram preparados outros corpos de prova para medidas do módulo de elasticidade no sistema Sonelastic® para avaliar a rigidez do material.

3.5.2. Moldagem dos corpos de prova para ensaio no sistema sonelastic®.

Para as análises no Sonelastic® foram usadas as normas ASTM E 1876 e a ABNT NBR 8522-2. Os corpos de prova foram preparados seguindo o mesmo procedimento de moldagem anterior. Para este caso, os corpos de prova devem ser no formato de discos com diâmetro de aproximadamente 4cm. Foi utilizado o molde mostrado na Figura 19. Foram preparados nove corpos de prova (Figura 20) com suas especificações mostradas na Tabela 5.

As medidas foram realizadas no equipamento Sonelastic® através da técnica de excitação por impulso, um método não destrutivo que utiliza o som (frequências naturais de vibração) emitido por um material após ser levemente golpeado para determinar suas propriedades elásticas e amortecimento, como mostrado na figura 21.

Segundo a divisão Sonelastic® da ATCP Engenharia Física, os sistemas Sonelastic® possuem pelo menos um suporte de corpo de prova, um pulsador, um captor acústico e o software Sonelastic®. São capazes de testar qualquer material com módulos elásticos entre 0,5 e 1.000 GPa, um processo não-destrutivo e caracteriza de forma simultânea o módulo de Young, o módulo de cisalhamento, o coeficiente de Poisson e o amortecimento.

Figura 19 – Molde para produzir disco como corpo de prova.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 4 – Dimensões dos corpos de prova (discos).

Amostras	Diâmetro (cm)	Altura (cm)
PLA virgem 1	3,97	0,35
PLA virgem 2	3,96	0,39
PLA 15wt% CaO <150 μm 1	3,97	0,35
PLA 15wt% CaO 150 μm 1	3,97	0,4
PLA 15wt% CaO 150 μm 2	3,97	0,44
PLA 15wt% CaO 300 μm 1	3,97	0,32
PLA 15wt% CaO 300 μm 2	3,96	0,36

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 20 – Amostras de discos.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 21 – Sistema Sonelastic®.



Fonte: Arquivo pessoal.

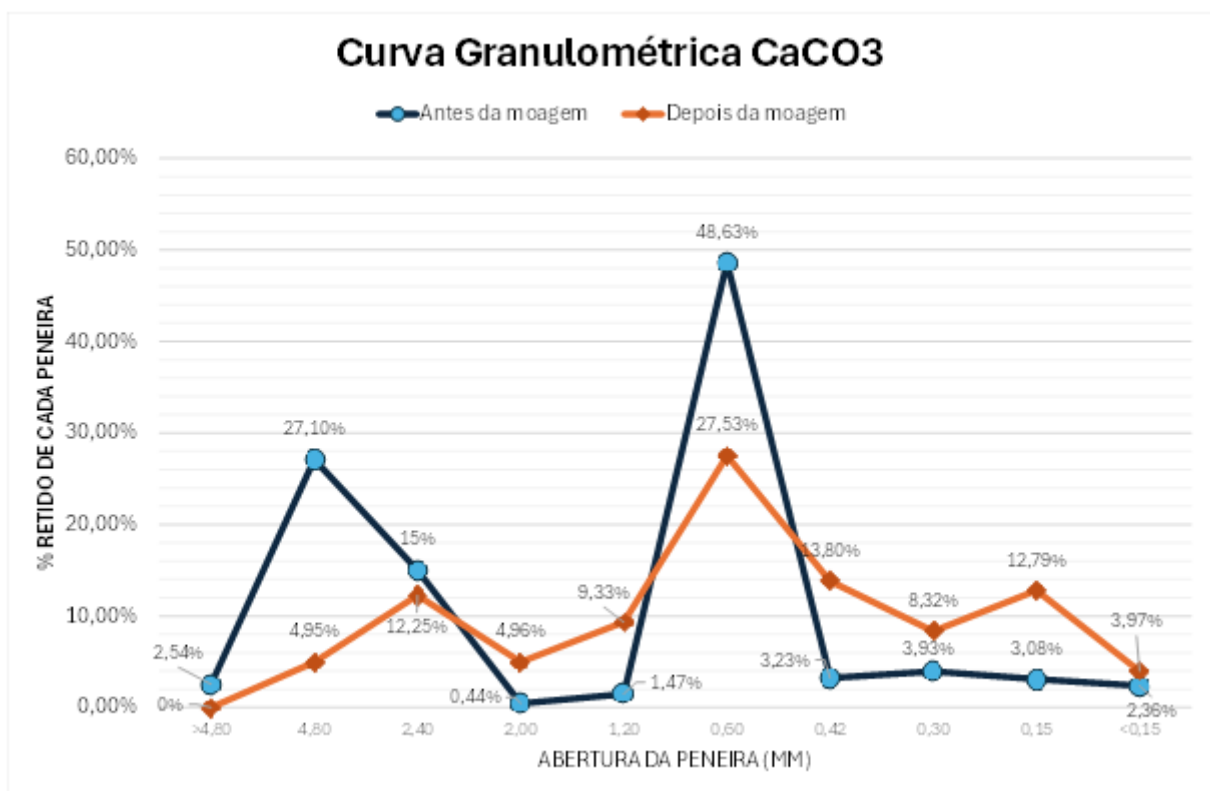
Os discos foram postos sobre o suporte de corpo de prova, onde o dispositivo de pulso foi posicionado e acionado no centro das amostras.

4 RESULTADOS

4.1 Análise granulométrica

Após a moagem de baixa energia, os tamanhos das partículas de CaCO_3 foram comparados aos iniciais, obtendo-se os seguintes resultados, conforme ilustrado na Figura 22. Observamos que o efeito imediato da moagem foi a quebra das partículas maiores. Isso é evidenciado pela queda acentuada da retenção das peneiras de maior abertura, na peneira de 4,80 mm a retenção caiu de 27,10% (antes) para apenas 4,95% (depois). E para a peneira 0,60 mm o pico principal do material original, que retinha 48,63% da massa, foi reduzido para 27,53%.

Figura 22 – Curva granulométrica antes e depois da moagem.



Fonte: Arquivo pessoal.

Conforme as partículas de maior dimensão foram fragmentadas, a distribuição de massa deslocou-se para as frações mais finas (à direita no gráfico), aumentando proporcionalmente a quantidade de material retido nas peneiras menores. Na faixa intermediária (0,42 mm a 1,20 mm), houve um aumento substancial. Na peneira de 0,42 mm, a retenção elevou-se de 3,23% para 13,80%. Na faixa fina (inferior a 0,15 mm), a quantidade de material retido quadruplicou, aumentando de 3,08% para 12,79%.

Antes da moagem (linha azul), a distribuição granulométrica apresentava caráter bimodal e irregular, com concentrações expressivas em apenas dois diâmetros específicos (4,80 mm e 0,60 mm) e praticamente ausência de material nas faixas intermediárias, sugerindo um material grosseiro e heterogêneo. Após a moagem (linha laranja), a curva tornou-se mais uniforme e contínua. Embora persista um pico em 0,60 mm, o processo de moagem preencheu as lacunas granulométricas que existiam anteriormente (como em 1,20 mm e 2,00 mm), resultando em um material com distribuição mais ou menos contínua e homogênea.

O processo de moagem demonstrou-se eficiente na redução do tamanho máximo das partículas, eliminando praticamente a totalidade dos grãos superiores a 4,8 mm. O produto final constitui um material significativamente mais fino e uniforme, com uma fração considerável (aproximadamente 30%) agora concentrada abaixo de 0,42 mm, o que presumivelmente incrementa sua reatividade química e melhora seu empacotamento para aplicação em compósitos.

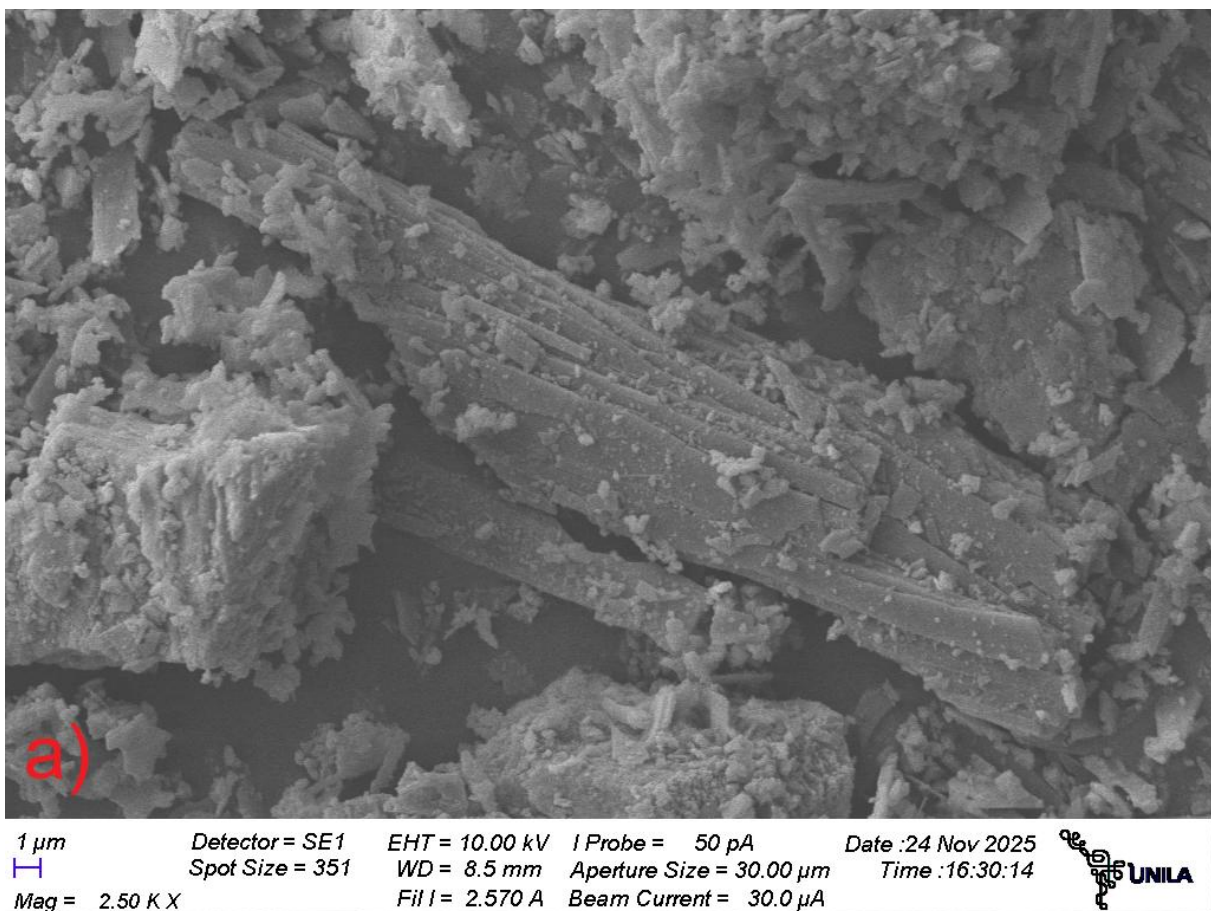
4.2 ANÁLISE MICROSCOPIA DE VARREDURA – MEV

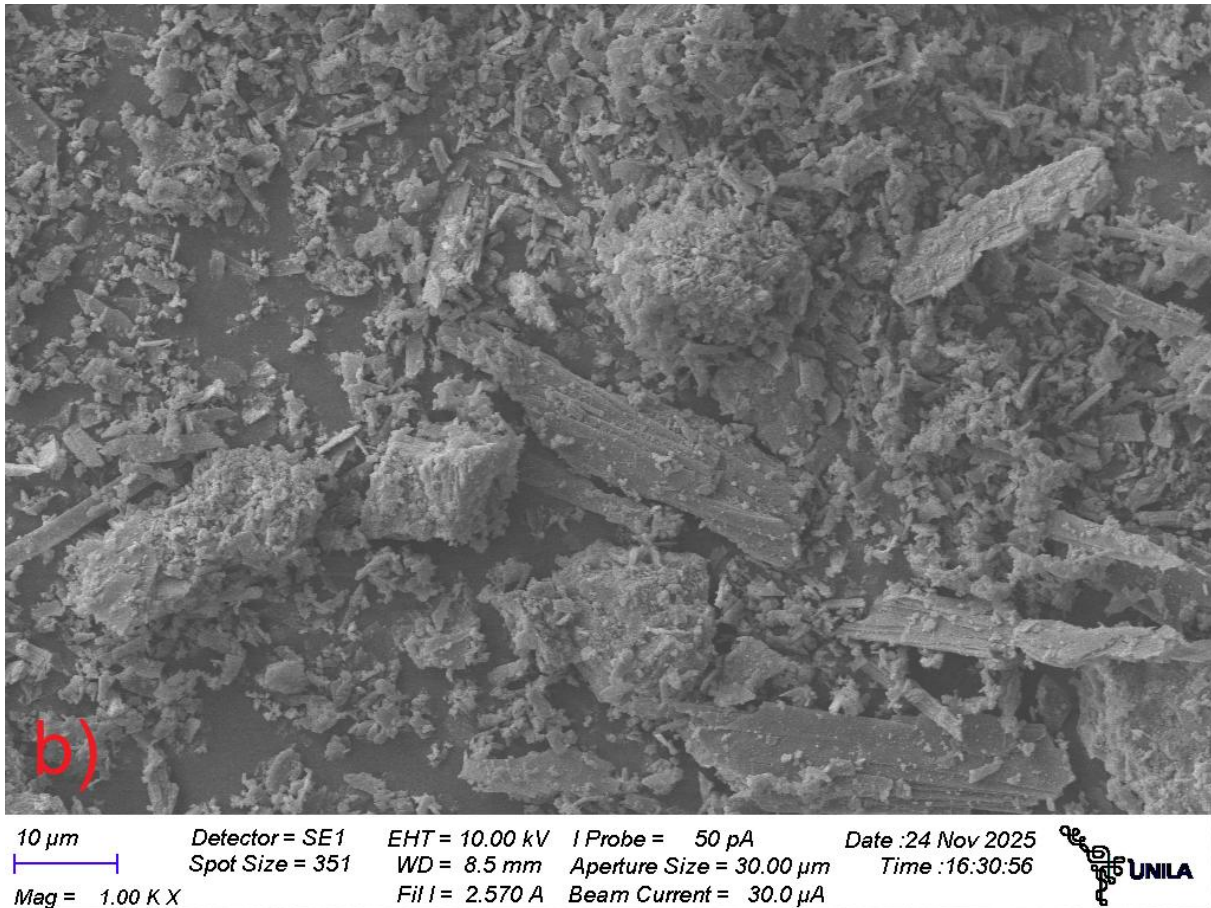
4.1.1 Análise do pó da casca de ostra

As imagens provenientes do microscópio eletrônico de varredura (MEV)

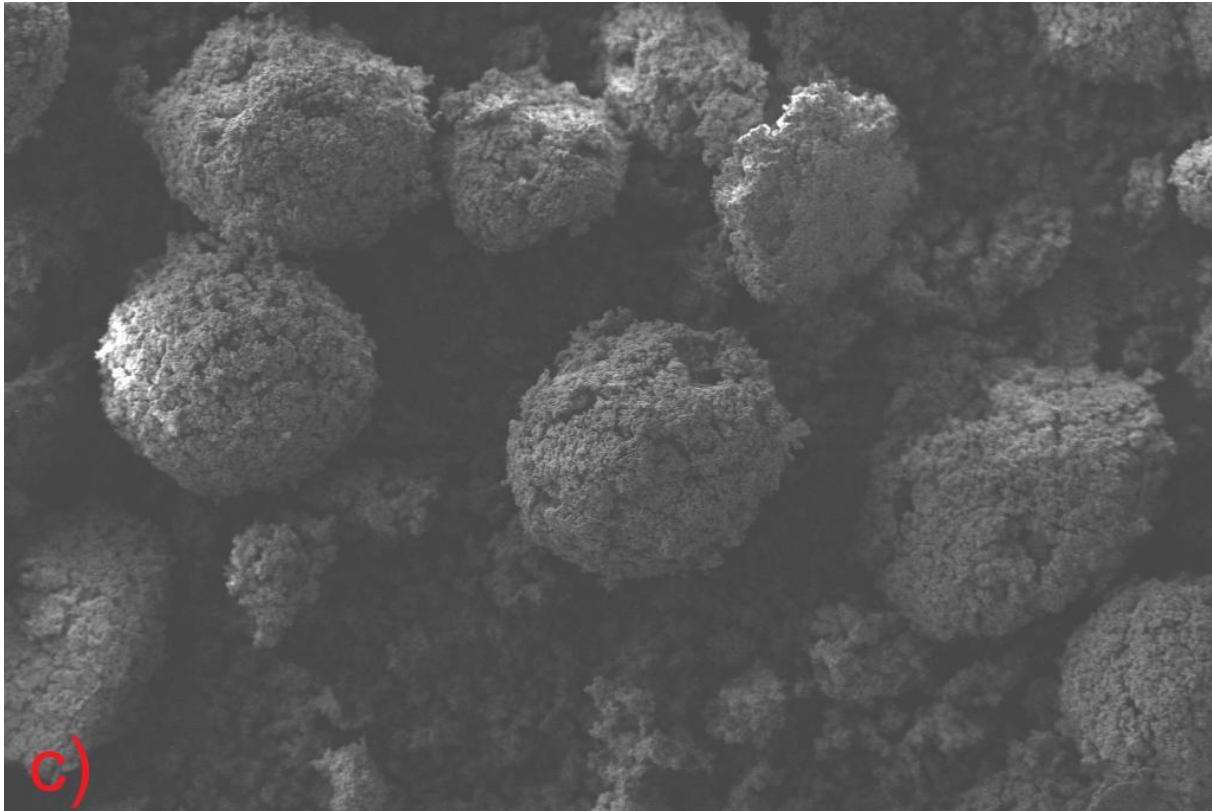
mostraram a caracterização das amostras para avaliar a morfologia do reforço (CaO/CaCO₃) após a moagem.

Figura 23 – Amostras do MEV. A) CaCO₃ 300 µm 2.50k x, B) CaCO₃ 300 µm 1.00k x, C) CaO 150 µm 100 x, D) CaO 150 µm 100 x, E) CaO 150 µm 2.50k x, F) CaO <150 µm 2.50k x, G) CaO <150 µm 1.00k x e H) CaO <150 µm 10.00k x.

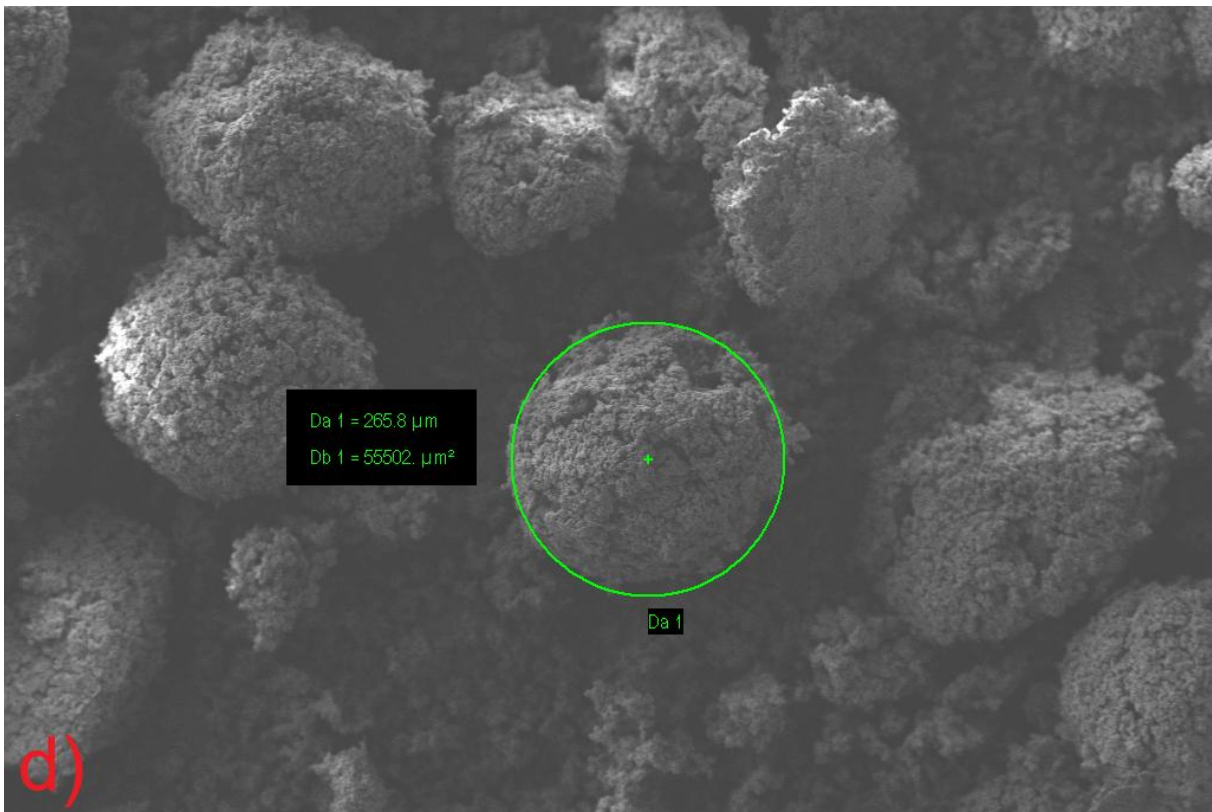




Segundo Phan et al. (2023), o aspecto laminado, caracterizado por estruturas empilhadas em forma de folhas ou placas, observado nas Figuras 23 a) e b), indica fortemente que o carbonato de cálcio presente nos grãos é de origem biogênica, condizente com a origem do material, no qual recebido, sendo casca de ostra.



c)
 100 μm Detector = SE1 EHT = 10.00 kV I Probe = 50 pA Date :24 Nov 2025
 |-----| Spot Size = 351 WD = 8.0 mm Aperture Size = 30.00 μm Time :16:21:32
 Mag = 100 X Fil I = 2.570 A Beam Current = 30.0 μA



Da 1 = 265.8 μm
 Db 1 = 55502. μm^2

Da 1

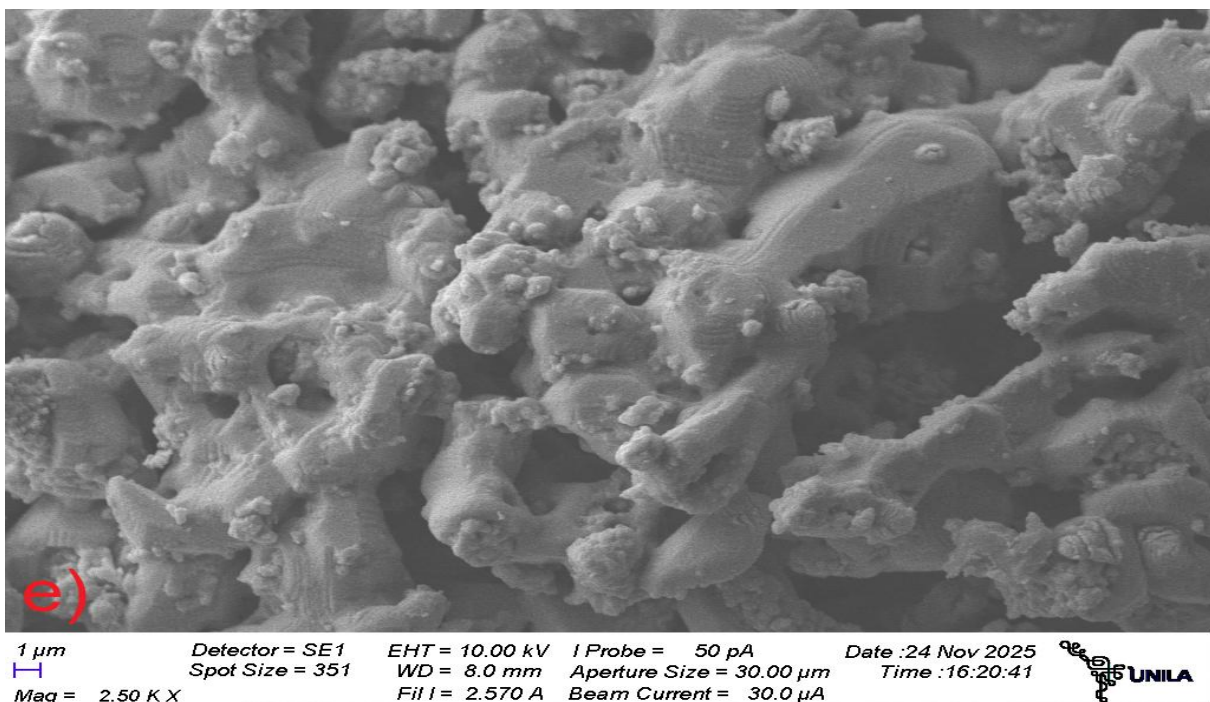
d)
 100 μm Detector = SE1 EHT = 10.00 kV I Probe = 50 pA Date :24 Nov 2025
 |-----| Spot Size = 351 WD = 8.0 mm Aperture Size = 30.00 μm Time :16:21:32
 Mag = 100 X Fil I = 2.570 A Beam Current = 30.0 μA

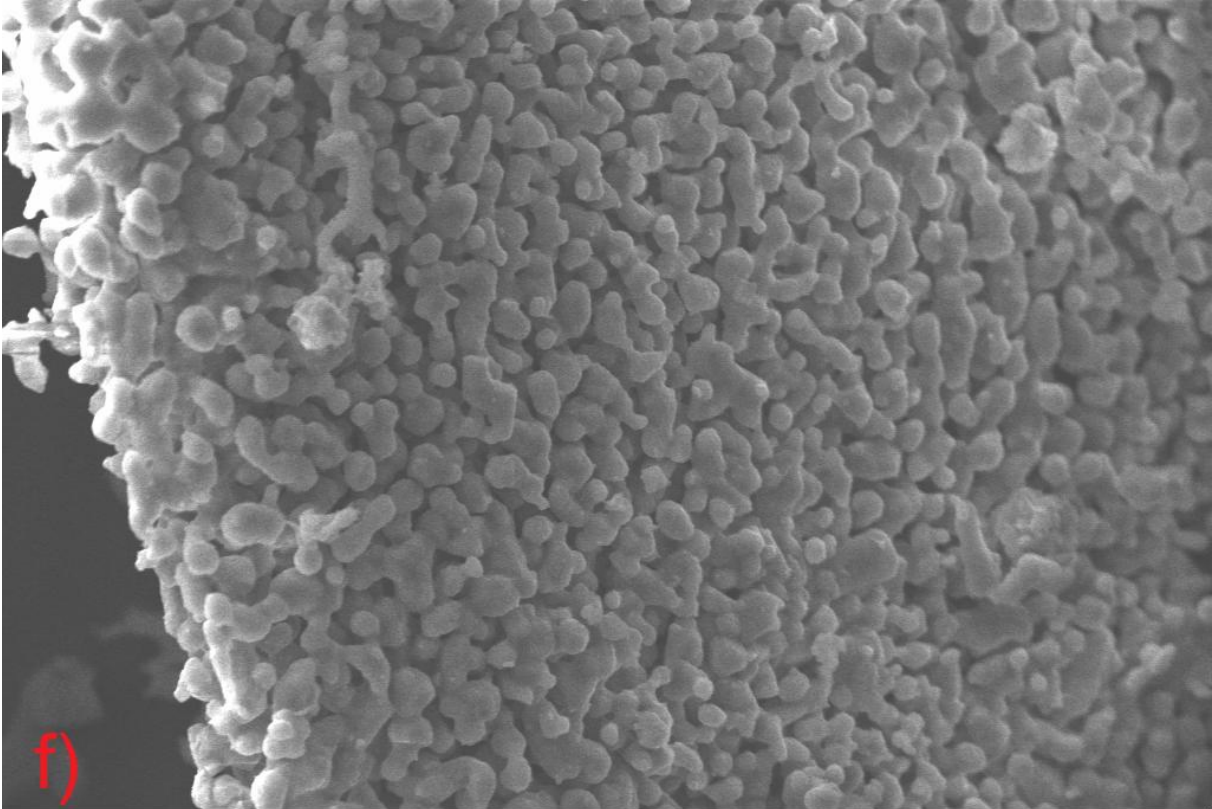


A partir da Figura 23 c) em diante, as amostras consistem em óxido de cálcio (CaO), produto resultante da calcinação do CaCO_3 . Essas amostras exibem morfologia distinta em comparação à amostra não calcinada, fenômeno atribuído a três eventos físico-químicos simultâneos que destroem a estrutura laminada original.

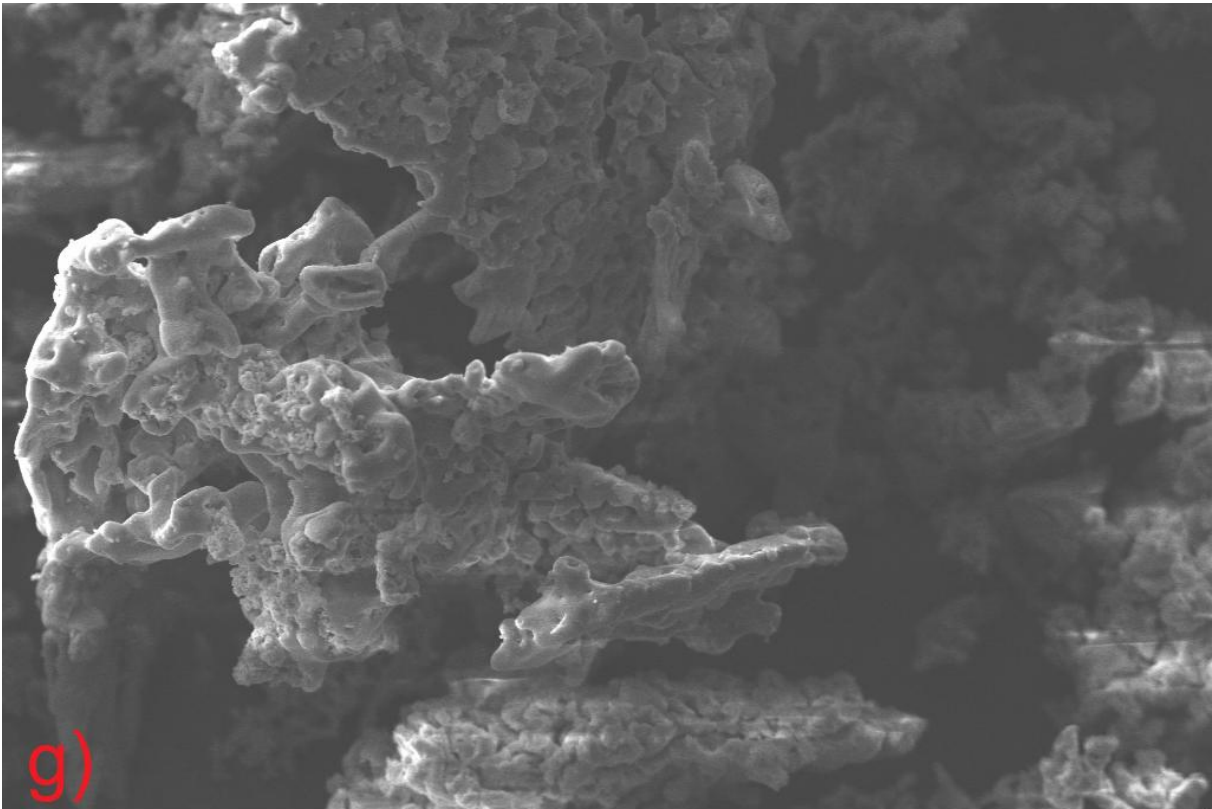
O primeiro evento envolve o aquecimento inicial (~300–500 °C), durante o qual a matéria biológica (matriz orgânica) que mantinha as lâminas de CaCO_3 coesas sofre degradação térmica. Esse processo causa delaminação inicial, levando à separação ou fragilização progressiva das camadas (Rocha, 2013).

Um segundo evento fundamental é a descarbonatação e liberação de gases (~700–900 °C), no qual o CO_2 deve escapar do interior do cristal sólido. A saída acentuada desse gás gera significativa porosidade no material, resultando em uma estrutura de CaO com aparência esponjosa ou altamente porosa, conforme observado nas Figuras 23 c) e d). Conseqüentemente, a densidade do material reduz-se substancialmente, sendo essa redução atribuída à diferença no volume molar entre CaO e CaCO_3 , gerando retração volumétrica (FABIANA DE SOUZA; SAULO ROCA BRAGANÇA, 2013).



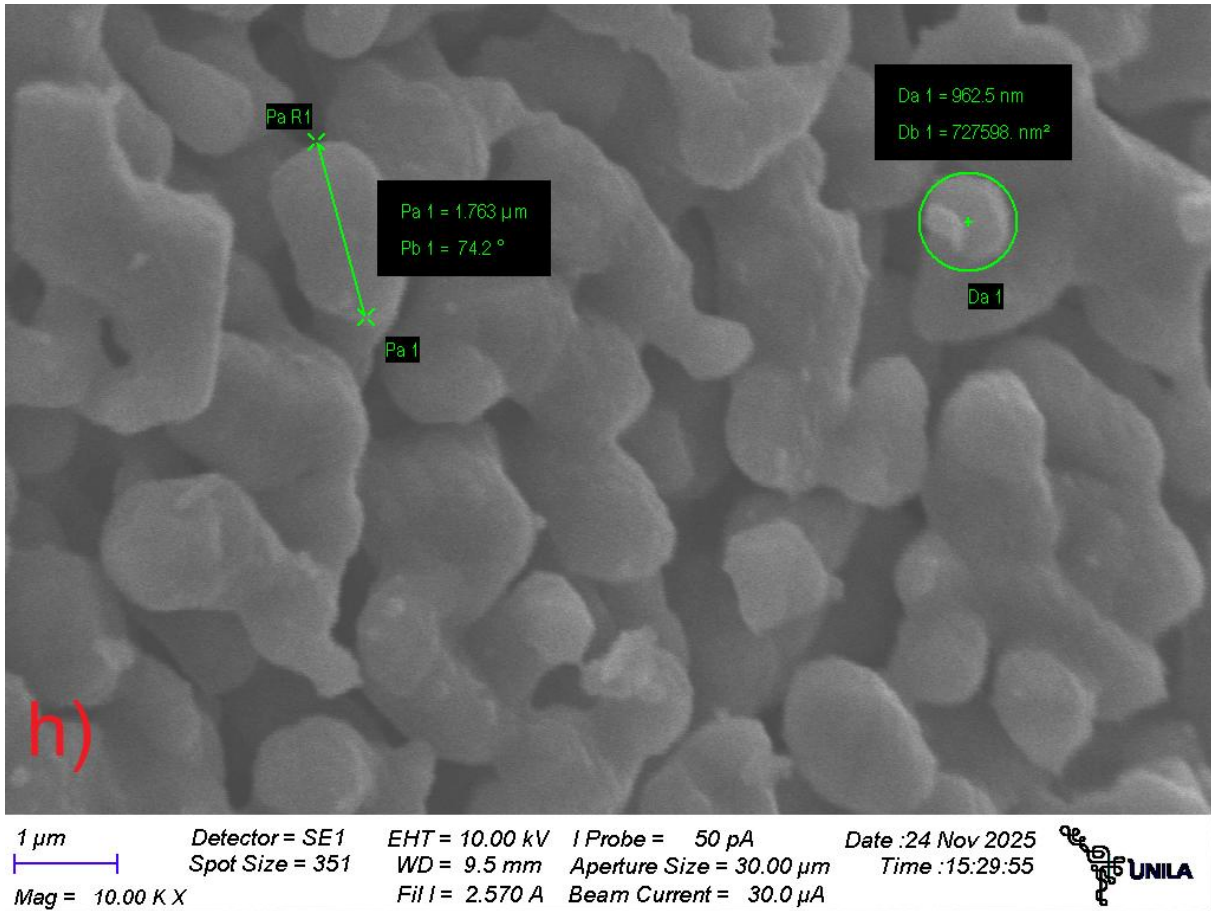


1 μm | Detector = SE1 | EHT = 10.00 kV | I Probe = 50 pA | Date : 24 Nov 2025
 | Spot Size = 351 | WD = 9.5 mm | Aperture Size = 30.00 μm | Time : 15:31:20
 Mag = 2.50 K X | Fil I = 2.570 A | Beam Current = 30.0 μA



10 μm | Detector = SE1 | EHT = 10.00 kV | I Probe = 50 pA | Date : 24 Nov 2025
 | Spot Size = 351 | WD = 9.5 mm | Aperture Size = 30.00 μm | Time : 15:33:04
 Mag = 1.00 K X | Fil I = 2.570 A | Beam Current = 30.0 μA



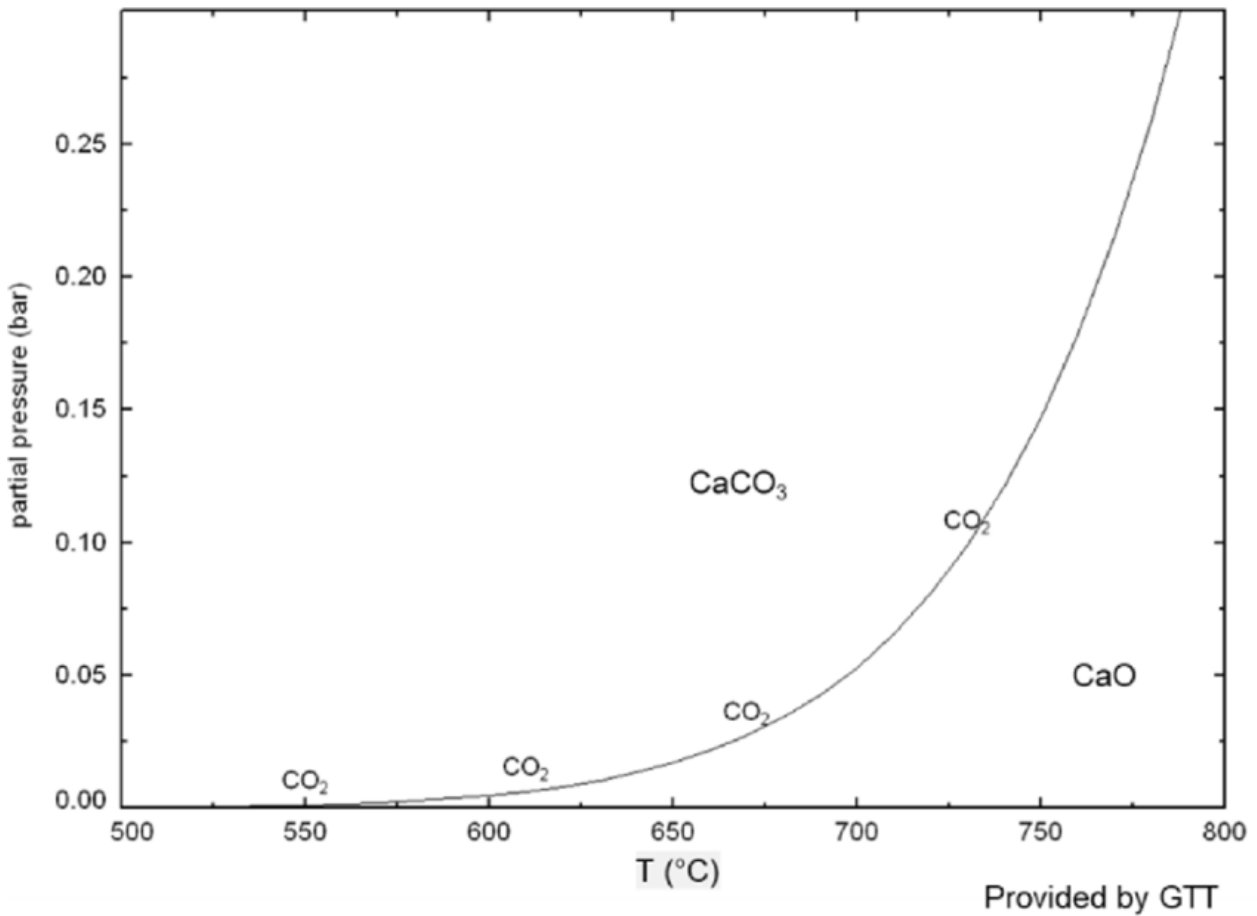


Fonte: Arquivo pessoal.

Por fim, ocorrem a sinterização e mudanças cristalinas, nas quais os pequenos grãos de CaO recém-formados tendem a se aglomerar e fundir para reduzir sua energia de superfície. Esse fenômeno explica a morfologia observada nas Figuras 23 e) e h), onde as partículas apresentam-se como glóbulos fundidos ou esferas aglomeradas. A estrutura cristalina transforma-se de ortorrômbica/romboédrica (CaCO_3) para cúbica (CaO), perdendo completamente a geometria original de placas planas (SOARES; HENRIQUE; BATISTA, 2022).

Figura 24 – Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{CaCO}_3\text{--CaO--CO}_2$

em função da temperatura e da pressão parcial de CO_2 .



Fonte: Adaptado de *Deer, Howie e Zussman (2013)*.

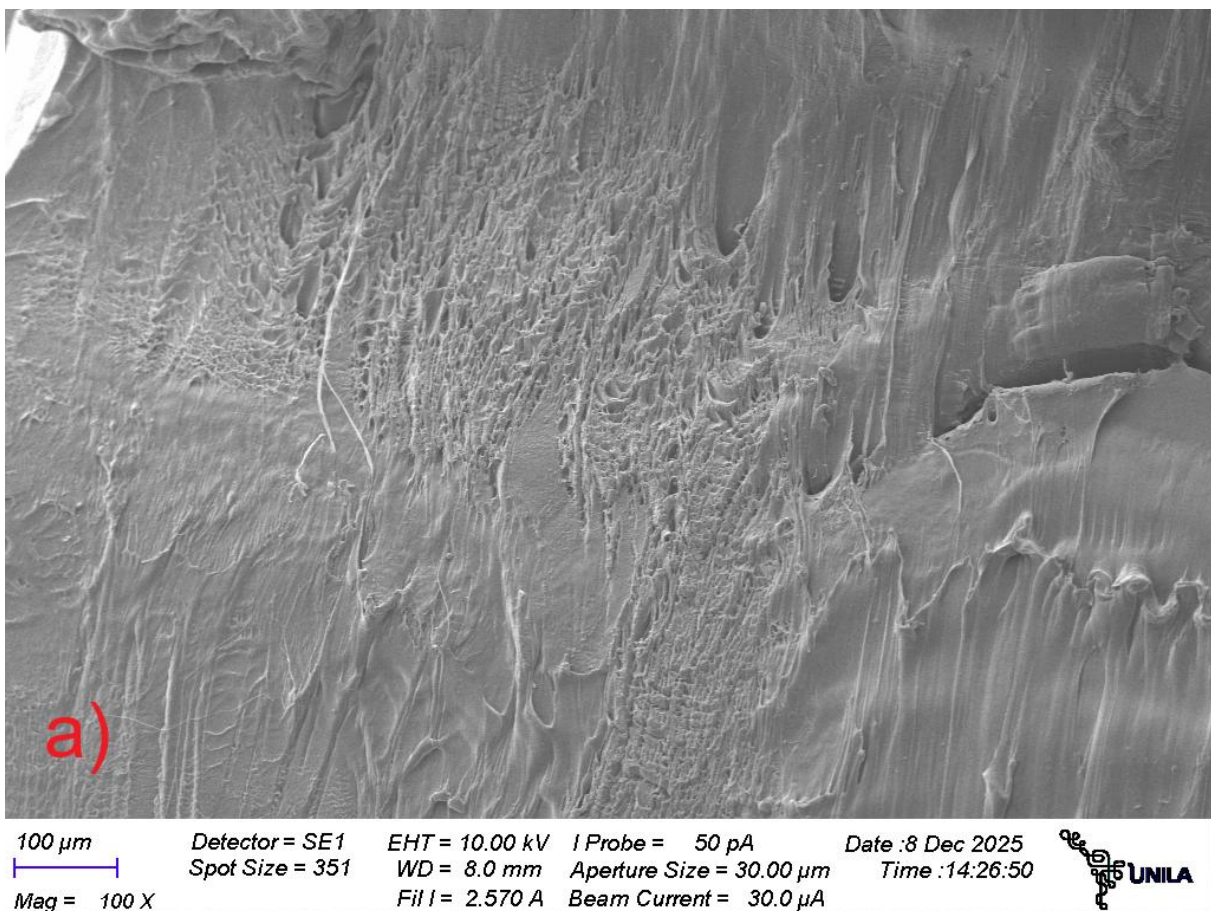
Em síntese, nas imagens a) e b) observa-se uma superfície lisa, compacta e estratificada, resultado da mineralização natural, enquanto nas imagens subsequentes verifica-se uma superfície rugosa, porosa e granular/esférica, decorrente da liberação de CO_2 e da fusão dos grãos pela ação térmica (sinterização).

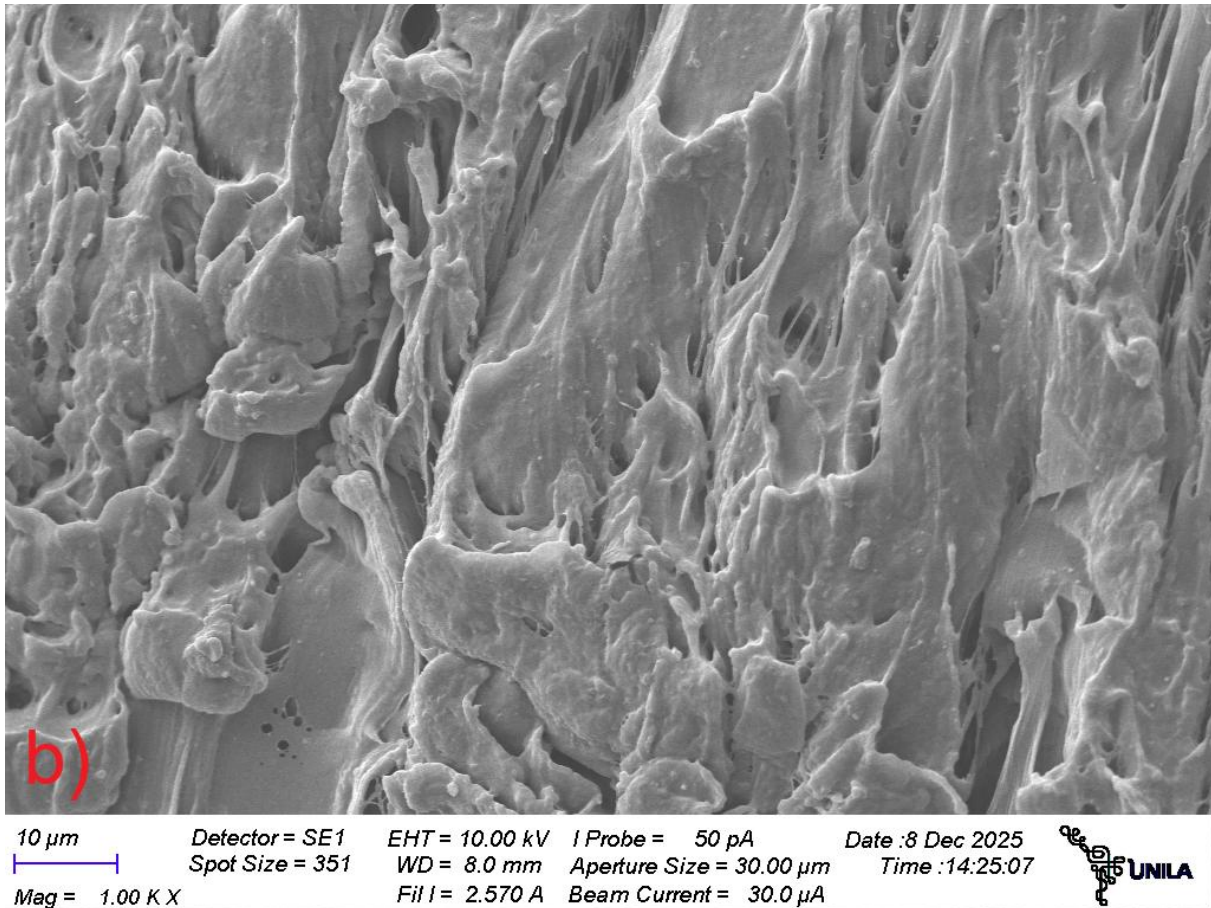
4.1.2 Análise do corpo de prova tipo “haltere”

Obtiveram-se imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

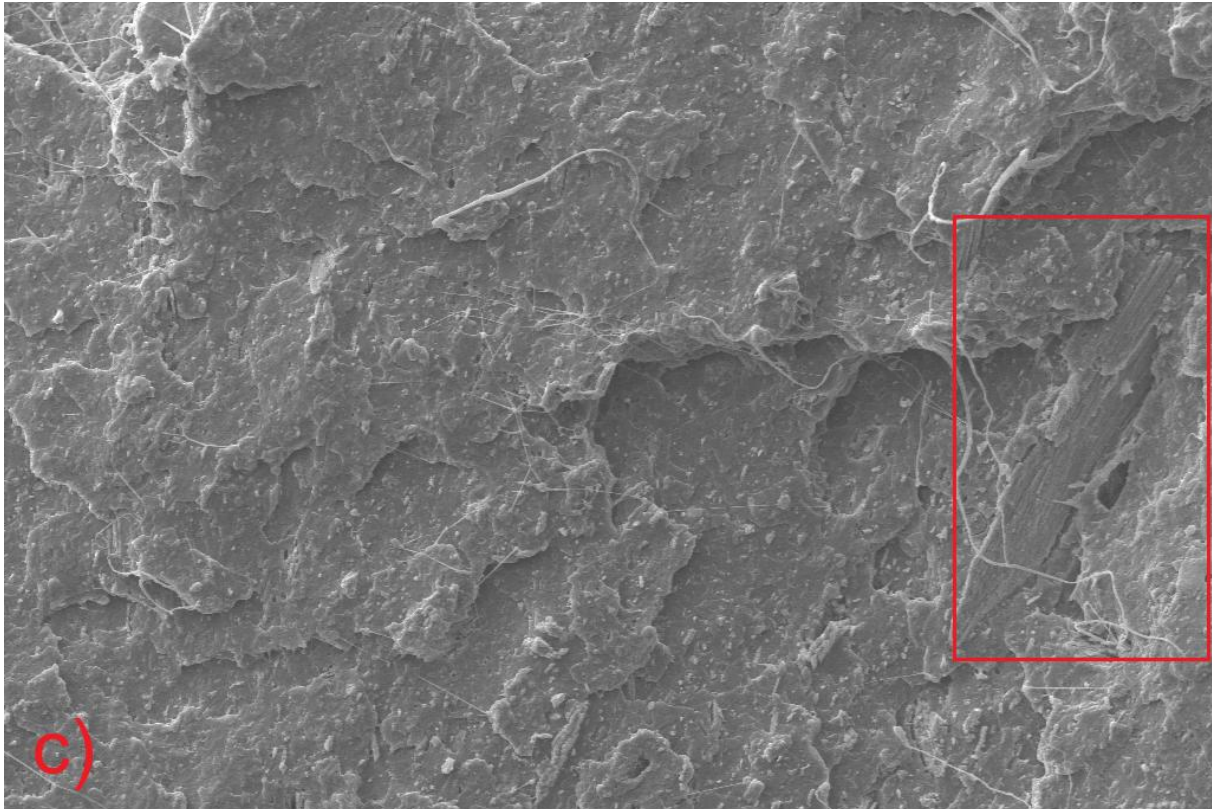
das superfícies de fratura, com o objetivo de analisar o comportamento do compósito e do PLA virgem. As imagens 24 ilustram como foi o comportamento mecânico do material.

Figura 25 – Amostras (PLA virgem e o Compósito) do MEV. A) PLA VIRGEM 100x B) PLA VIRGEM 1.00k x C) PLA 15wt% CaCO₃ 300µm 500x D) PLA 15wt% CaCO₃ 300µm 100x E) PLA 15wt% CaO 150µm 100x F) PLA 15wt% CaO 150µm 1.00k X G) PLA 15wt% CaO <150µm 5.00k x H) PLA 15wt% CaO <150µm 100x





Segundo Drumright et al. (2000), Auras et al. (2004) e Gupta & Kumar (2007), o PLA virgem apresenta alto módulo elástico e baixa deformação na ruptura, sendo geralmente classificado como um polímero rígido. Na Figura 25 a), observa-se linhas de fluxo bem definidas, uma superfície relativamente lisa (característica de mecanismo frágil com deformação frágil) e pequenas bifurcações visíveis que são consistentes com propagação de crazes (Williams J.G., 2016; Gao Z, 2003). Uma característica proeminente na Figura 25 b) é um padrão das fibrilas poliméricas visíveis na superfície, ausência de depressões cônicas (características de fratura dúctil pura), padrão tridimensional complexo com múltiplos níveis de altura (aspecto de “caverna”) e vazios entre a fibrilas (indicando cavitação e formação de crazes). Callister (2012) diz que esse fenômeno precede com frequência na fratura em alguns polímeros termoplásticos, levando à formação de pequenos microvazios interligados, formando as fibrilas e orientando cadeias moleculares entre esses vazios iguais a Figura 25 b).



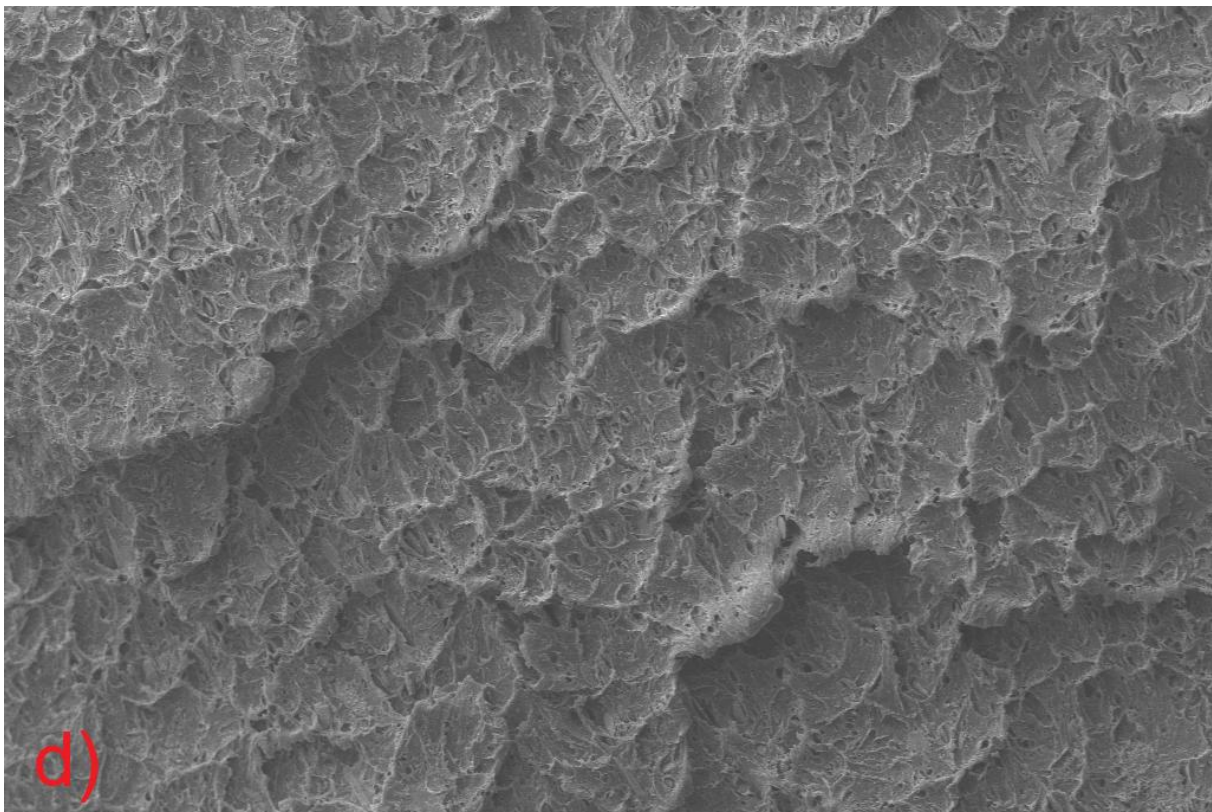
10 μm
 ───
 Mag = 500 X

Detector = SE1
 Spot Size = 351

EHT = 10.00 kV
 WD = 9.5 mm
 Fil I = 2.570 A

I Probe = 50 pA
 Aperture Size = 30.00 μm
 Beam Current = 30.0 μA

Date : 8 Dec 2025
 Time : 14:36:15



100 μm
 ───
 Mag = 100 X

Detector = SE1
 Spot Size = 351

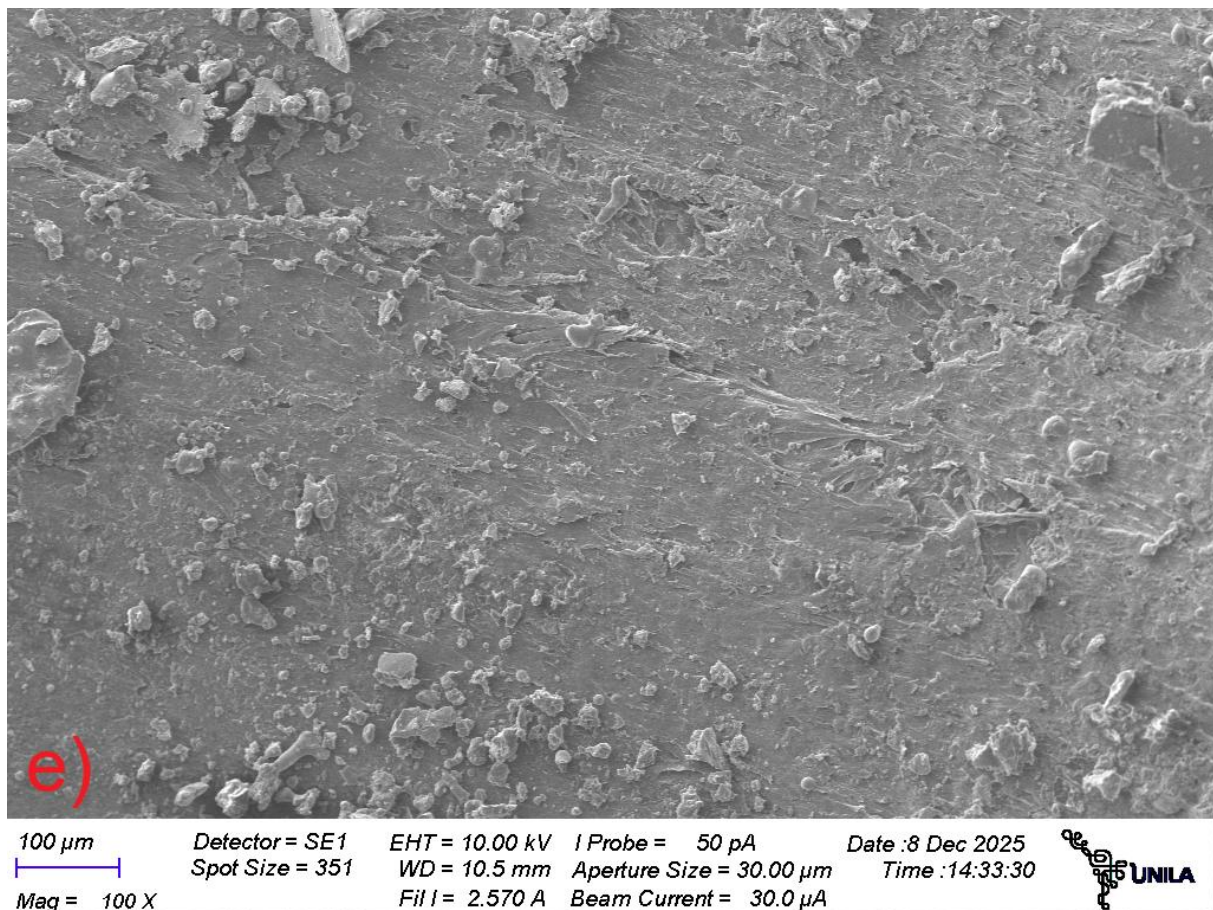
EHT = 10.00 kV
 WD = 9.5 mm
 Fil I = 2.570 A

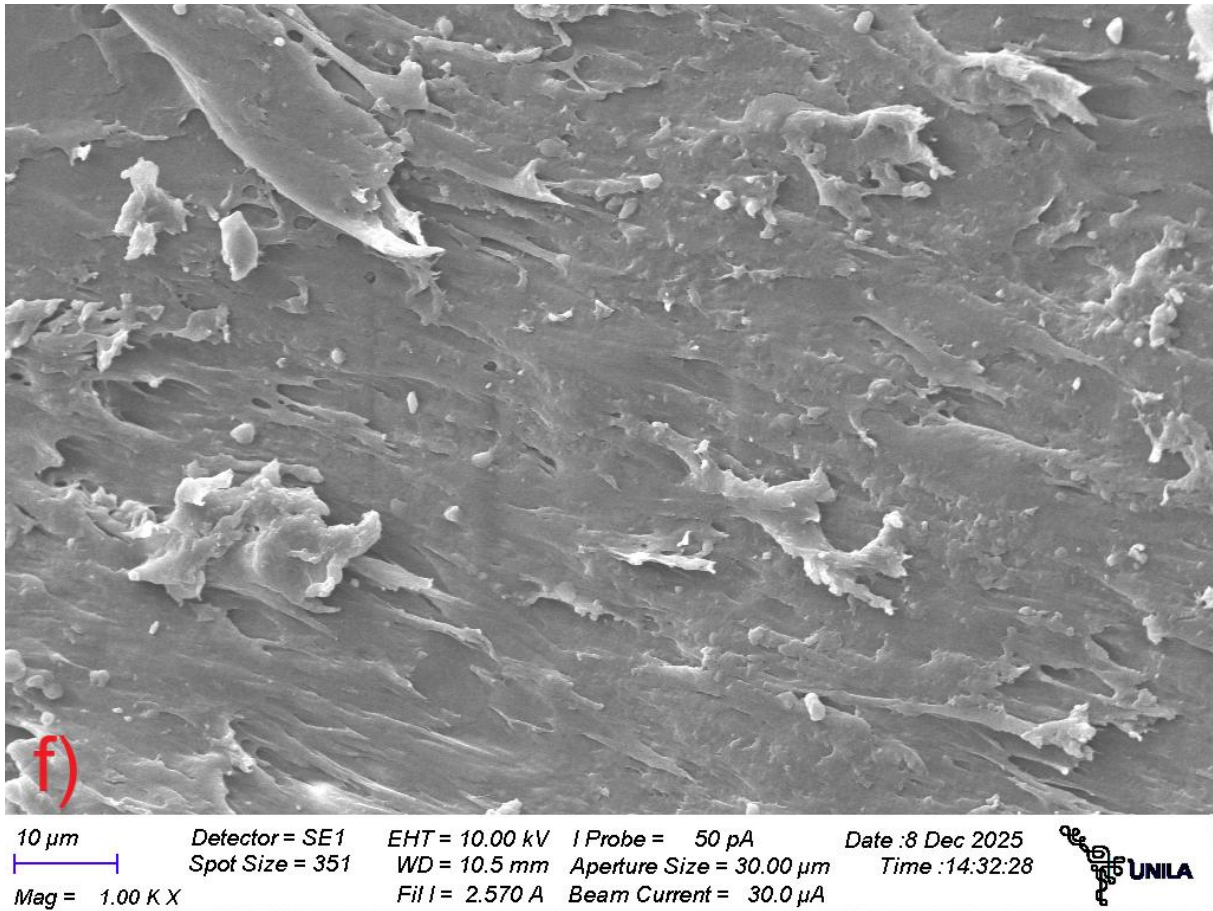
I Probe = 50 pA
 Aperture Size = 30.00 μm
 Beam Current = 30.0 μA

Date : 8 Dec 2025
 Time : 14:37:24

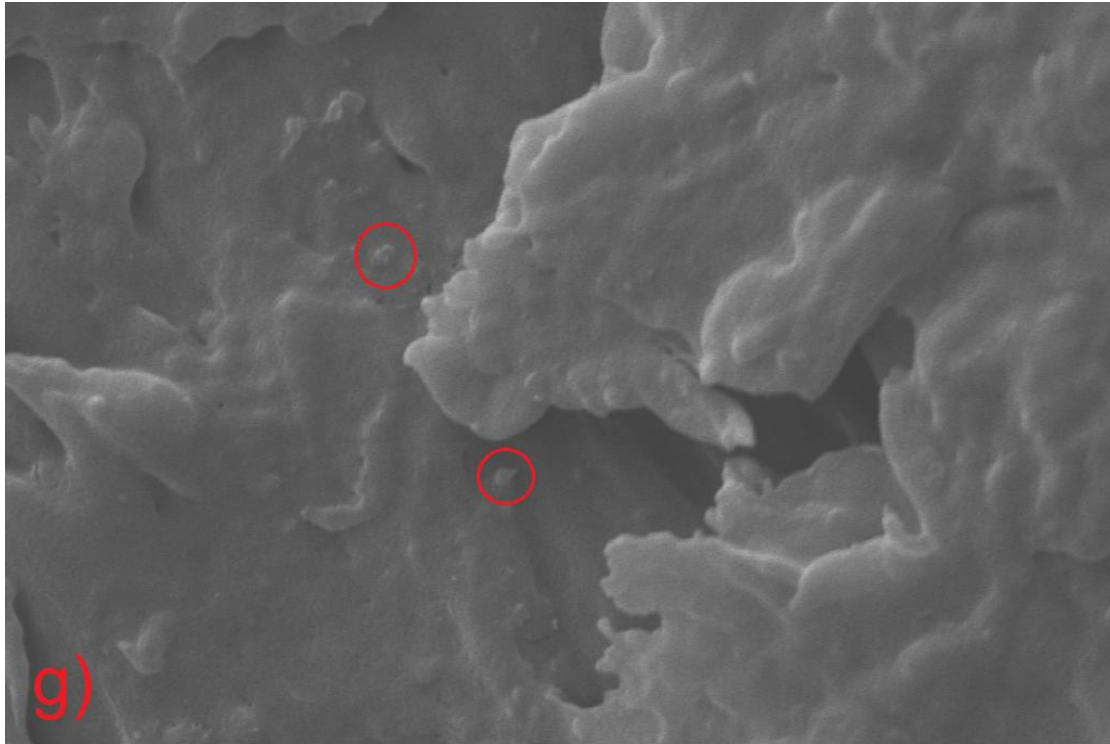


As Figuras 24 c) e d) do compósito PLA/CaCO₃ (300 µm) evidenciam um mecanismo de falha dominado pelo descolamento interfacial (debonding), caracterizado pela presença de cavidades limpas e partículas expostas, indicando fraca adesão entre a matriz polimérica e a carga mineral, conforme descrito por Jiang et al. (2007) para sistemas sem tratamento superficial eficiente. A granulometria grosseira atua como concentrador de tensões crítico, perturbando a propagação de trinca e gerando uma superfície de fratura rugosa e irregular. De acordo com Fu et al. (2008), partículas de grandes dimensões tendem a reduzir a resistência mecânica do compósito quando a adesão interfacial é insuficiente, atuando como defeitos estruturais na matriz polimérica.

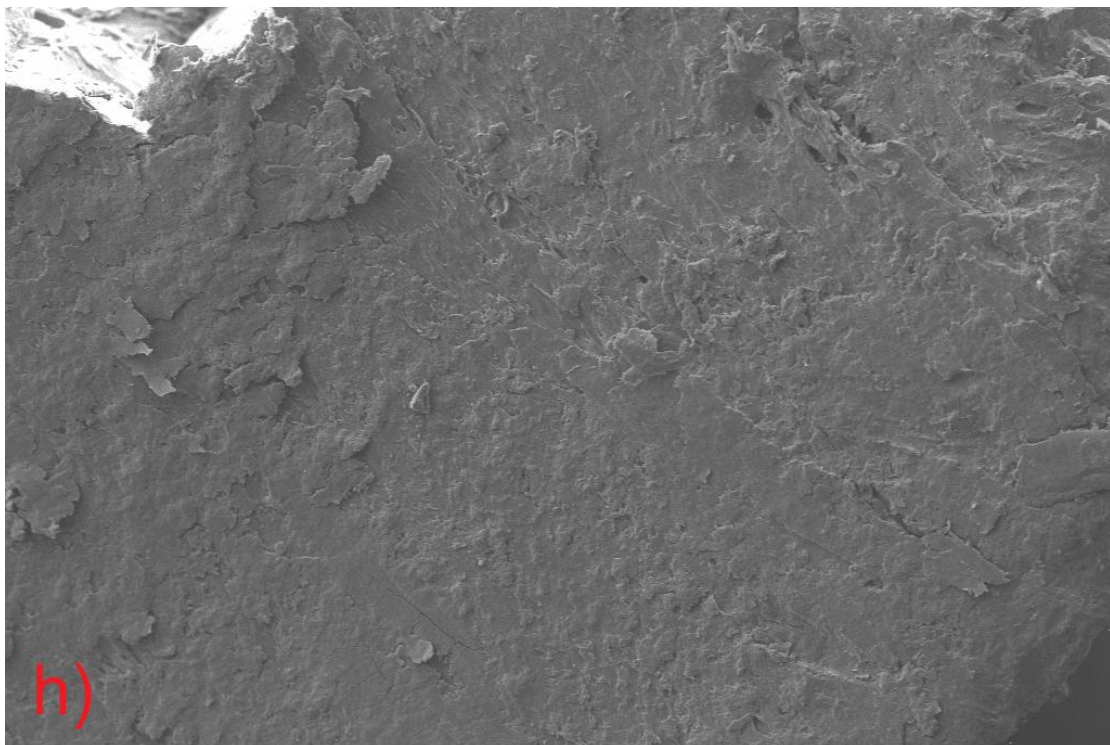




A análise da Figura 25 e) e f) do compósito PLA/CaO revela uma morfologia de fratura com deformação plástica localizada, na qual as partículas de CaO apresentam-se recobertas pela matriz polimérica. Esse comportamento, que sugere uma interação interfacial distinta (Louzil et al., 2021), contrasta com o descolamento limpo (debonding) observado em compósitos com cargas menos reativas (PLA com CaCO_3). A presença de fibrilas deformadas indica um mecanismo de tenacificação por ancoragem mecânica, no qual a partícula força a matriz a se deformar plasticamente antes da ruptura final, fenômeno descrito em detalhe pela mecânica da fratura de compósitos (Fu et al., 2008; Zywczyński et al., 2001).



1 μm | Detector = SE1 | EHT = 10.00 kV | I Probe = 50 pA | Date : 8 Dec 2025
| Spot Size = 351 | WD = 10.0 mm | Aperture Size = 30.00 μm | Time : 14:28:03
Mag = 5.00 K X | Fil I = 2.570 A | Beam Current = 30.0 μA



100 μm | Detector = SE1 | EHT = 10.00 kV | I Probe = 50 pA | Date : 8 Dec 2025
| Spot Size = 351 | WD = 10.0 mm | Aperture Size = 30.00 μm | Time : 14:30:31
Mag = 100 X | Fil I = 2.570 A | Beam Current = 30.0 μA



Fonte: Arquivo pessoal.

No entanto, as Figuras 24 g) e h) de MEV do compósito PLA/CaO com granulometria fina ($<150 \mu\text{m}$) revelam uma superfície de fratura com textura fina e homogênea, distinta da rugosidade grosseira observada em amostras com partículas maiores. Em alta amplitude, observa-se uma dispersão uniforme de micropartículas bem ancoradas na matriz polimérica, sem evidências significativas de descolamento (debonding) ou vazios de arrancamento (pull-out). Segundo Aliotta et al. (2019) e Tazibt et al. (2023), a redução do tamanho de partícula e a melhoria na dispersão favorecem a nucleação de múltiplos micro mecanismos de deformação (como crazing distribuído), promovendo uma interação interfacial mais eficiente que pode resultar em propriedades mecânicas superiores comparadas a compósitos com cargas grosseiras.

4.3 ANÁLISE SONELASTIC®

A tabela 5 mostra os valores obtidos de acordo com a técnica de excitação por impulso Sonelastic®.

Tabela 5 – Média e desvio padrão do módulo de elasticidade das amostras.

Amostra	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)
PLA VIRGEM 1	10,45052	0,080136
PLA VIRGEM 2	8,16296	0,110168
PLA 15wt% $<150 \mu\text{m}$	4,0439	0,13628
PLA 15wt% $150 \mu\text{m}$ 2	2,92856	0,098672
PLA 15wt% $150 \mu\text{m}$ 1	2,94252	0,043112
PLA 15wt% $300 \mu\text{m}$ 2	7,14762	0,056416
PLA 15wt% $300 \mu\text{m}$ 1	9,95592	0,090664

Fonte: Arquivo pessoal.

Os valores de módulo de elasticidade obtidos por excitação por impulso refletem não apenas a natureza intrínseca do PLA e dos compósitos com CaCO_3 e CaO , mas também a microestrutura observada em MEV e as limitações do processamento por injeção manual, desprovido de controle de pressão, temperatura e velocidade de preenchimento. O PLA virgem, descrito na literatura como um polímero de elevada rigidez e comportamento vítreo à temperatura ambiente (Drumright; Gruber; Henton, 2000; Auras; Harte; Selke, 2004; Gupta; Kumar, 2007), apresentou os maiores módulos entre os materiais puros, enquanto o PLA reciclado exibiu redução de módulo e maior dispersão, em consonância com estudos que indicam degradação de cadeia e alteração morfológica após reprocessamento (Auras; Harte; Selke, 2004; Gupta; Kumar, 2007).

Nos compósitos com CaCO_3 de granulometria grossa (300 μm), as micrografias indicaram fraca adesão interfacial, arrancamento de partículas e formação de cavidades, cenário em que, segundo modelos micro mecânicos e resultados experimentais, as partículas atuam como defeitos e não como reforço, comprometendo a rigidez global (Fu et al., 2008; Jiang; Zhang; Wolcott, 2007). Em contraste, nos compósitos com CaO , especialmente com granulometria inferior a 150 μm , as partículas finas apresentam-se bem embutidas e ancoradas na matriz, sem evidência generalizada de descolamento (debonding), o que favorece a transferência de tensão e, conforme reportado para compósitos de PLA com reforços rígidos finos e reativos, resulta em aumento efetivo do módulo de elasticidade (Aliotta et al., 2019; Louzil et al., 2021; Tazibt et al., 2023).

Porém a variabilidade dos valores, evidenciada pelos desvios-padrão, está diretamente ligada à natureza manual do processamento, que intensifica a formação de vazios internos, gradientes de cristalinidade e heterogeneidade na dispersão da carga, efeitos amplamente documentados na literatura de processamento de polímeros e compósitos particulados (Callister; Rethwisch, 2016; Fu et al., 2008).

O impacto negativo do processamento manual sem controle de parâmetros sobre os módulos de elasticidade pode ser sustentado pela literatura de processamento de polímeros e compósitos particulados, que destaca a importância de pressão, temperatura, velocidade de injeção e histórico térmico na formação da microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas. Em polímeros vítreos como o PLA, o grau de cristalinidade, a presença de vazios, a orientação de cadeias e a dispersão de fases secundárias são fortemente influenciados pelas condições de injeção, afetando diretamente o módulo de elasticidade e sua reprodutibilidade (Callister; Rethwisch, 2016; Auras; Harte; Selke, 2004).

Em compósitos particulados, variações de pressão, cisalhamento e tempo de residência térmica impactam a adesão interfacial, a formação de poros e a distribuição espacial das partículas, de modo que a falta de controle de processamento tende a aumentar a porosidade, a heterogeneidade microestrutural e a dispersão dos resultados de módulo, podendo inclusive reduzir o valor médio medido em relação ao esperado teoricamente (Fu et al., 2008; Jiang; Zhang; Wolcott, 2007).

Assim, a combinação de um material sensível à cristalinidade e aos defeitos, como o PLA, com uma rota de injeção manual sem parâmetros definidos constitui um cenário em que desvios significativos e elevados desvios-padrão nos módulos determinados por excitação por impulso são não apenas esperados, mas coerentes com o relato da literatura acerca da influência do processamento nas propriedades mecânicas de polímeros e compósitos.

5 CONCLUSÕES

A produção do compósito PLA reforçado com casca de ostra foi realizada por meio de técnica manual de mistura e injeção, no entanto, ficou claro que a falta de controle das variáveis do processo prejudicou a qualidade do compósito)

Das caracterizações propostas a serem realizadas, não foi possível realizar o FTIR por motivos técnicos.

Foi possível refinar e dispersar parte das partículas de casca de ostra com a moagem de baixa energia. Não houve uma redução considerável, mas houve melhor distribuição de tamanho depois da moagem;

Foram realizadas tentativas de quantificar as propriedades mecânicas via ensaio de tração e medida do módulo de elasticidade dinâmico (sonelastic), no entanto, os resultados obtidos não são confiáveis devido a forma de operar o equipamento e os defeitos técnicos.

As micrografias das superfícies de fratura dos corpos de prova mostram que:

- O PLA virgem possui crazing distribuídos por causa de sua rigidez;
- Houve debonding com CaCO₃ devido a estrutura ser laminada;
- Fibrilas deformadas são visíveis com CaO 150 um, forçando a matriz deformar plasticamente antes da ruptura;
- Com particulados <150 um, houve maior homogeneidade com distribuição uniforme das micropartículas e ancoragem na matriz polimérica.

Desenvolver uma técnica de moldagem que permita reprodutibilidade na produção de Compósitos a base de PLA;

Realizar a caracterização mecânica com utilização de equipamentos com

melhores condições de ajustes;

Produzir corpos de prova a partir de outras técnicas de processamento, como a impressão 3D para que possa ser caracterizado e analisado sua viabilidade de produção;

Preparar o reforço por moagem de alta energia com a intenção de obter e usar partículas nanométricas no compósito;

Realizar análise qualitativa da interface na matriz-reforço por meio do FTIR.

REFERÊNCIAS

1. ALIOTTA, L. et al. Rigid filler toughening in PLA-Calcium Carbonate composites: Effect of particle surface treatment and matrix plasticization. **European Polymer Journal**, v. 113, p. 78–88, 1 abr. 2019.
2. **ALVARENGA, R. A. F. de**; GALINDRO, B. M.; HELPA, C. F.; SOARES, S. R. The recycling of oyster shells: An environmental analysis using Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 106, p. 102-109, 2012.
3. ATUL KUMAR MAURYA et al. Biodegradable polymers and composites: Recent development and challenges. **Polymer composites**, 10 dez. 2023.
4. AURAS, R.; HARTE, B.; SELKE, S. An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience*, Weinheim, v. 4, n. 9, p. 835-864, 2004.
5. **BIOMATERIAIS: a inovação sustentável para o futuro dos materiais.** [S. l.]: Vegan Business, 30 set. 2024. Disponível em: <https://veganbusiness.com.br/biomateriais-a-inovacao-sustentavel-para-o-futuro-dos-materiais/>. Acesso em: 20 fev. 2025.
6. CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
7. **Caracterização dos módulos elásticos de materiais | Sonelastic®.** Disponível em: <<https://sonelastic.com/pt/>>. Acesso em: 11 dez. 2025.
8. CHAWLA, Krishan K. **Composite Materials: Science and Engineering.** 4. ed. [S. l.]: Springer, 2019. ISBN 3030289850.
9. **CONCHAS BRASIL.** De que são feitas as conchas? Disponível em: <https://conchasbrasil.org.br/de-que-sao-feitas-as-conchas/>. Acesso em: 14 jan. 2026.
10. COSTA, A. R. S.; OLIVEIRA, B.M.C.; ARAUJO, G.V.R., SILVA, T.E.P., EL-DEIR, S.G. Viabilidade do uso de conchas de mariscos como corretivo de solos. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia/GO – 19 a 22/11/2012.
11. CREE, D.; SOLEIMANI, M. Bio-Based White Eggshell as a Value-Added Filler in Poly (Lactic Acid) Composites. **Journal of Composites Science**, v. 7, n. 7, p. 278, 1 jul. 2023.

12. DE ALMEIDA, J. F. M. et al. Rheological, mechanical and morphological behavior of polylactide/nano-sized calcium carbonate composites. **Polymer Bulletin**, v. 73, n. 12, p. 3531–3545, 9 abr. 2016.
13. DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. *An introduction to the rock-forming minerals*. 3. ed. London: Mineralogical Society, 2013.
14. DEVILLA, M. H. A inserção da casca de ostra na economia circular: sustentabilidade, ODS e reutilização de resíduos no Ribeirão da Ilha – SC. **Navus**, v. 17, e2219, 2025.
15. DONATE, R. et al. Calcium Carbonate Coating of 3D-Printed PLA Scaffolds Intended for Biomedical Applications. **Polymers**, v. 15, n. 11, p. 2506, 1 jan. 2023.
16. DRUMRIGHT, R. E.; GRUBER, P. R.; HENTON, D. E. Polylactic acid technology. *Advanced Materials*, Weinheim, v. 12, n. 23, p. 1841-1846, 2000.
17. EAD, A. S.; APPEL, R.; ALEX, N.; AYRANCI, C.; CAREY, J. P. Life cycle analysis for green composites: A review of literature including considerations for local and global agricultural use. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 34, n. 12, p. 1597-1623, 2021.
18. FABIANA DE SOUZA; SAULO ROCA BRAGANÇA. Caracterização tecnológica de um calcário dolomítico in natura, calcinado e sulfatado como meio dessulfurante. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 331–337, 1 jun. 2013.
19. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. **SOFIA Report**, Roma: FAO, 2024.
20. FRIEDRICH K., SCHERF G. Fracture mechanics of brittle polymers and polymeric nanocomposites. In: *Fracture Mechanics of Polymers, Composites and Adhesives*. Woodhead Publishing, 2016.
21. FU, S.-Y.; FENG, X.-Q.; LAUKE, B.; MAI, Y.-W. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.l.], v. 39, n. 6, p. 933-961, 2008.
22. GAO Z., MAI Y.-W. Fracture of semicrystalline polymers. In: *Comprehensive Structural Integrity*. Elsevier, 2003, p. 365-420.
23. GBADEYAN, O. J.; LINGANISO, L. Z.; DEENADAYALU, N. Thermomechanical

characterization of bioplastic films produced using a combination of polylactic acid and bionano calcium carbonate. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 15 set. 2022.

24. **GIGANTE, V.**; CINELLI, P.; RIGHETTI, M. C.; SANDRONI, M.; TOGNOTTI, L.; SEGGIANI, M.; LAZZERI, A. Evaluation of Mussel Shells Powder as Reinforcement for PLA-Based Biocomposites. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 15, p. 5364, 2020
25. GUPTA, A. P.; KUMAR, V. New emerging trends in synthetic biodegradable polymers – polylactide: a critique. *European Polymer Journal*, Oxford, v. 43, n. 10, p. 4053-4074, 2007.
26. JIANG, L.; ZHANG, J.; WOLCOTT, M. P. Comparison of polylactide/nano-sized calcium carbonate and polylactide/montmorillonite composites: Reinforcing effects and toughening mechanisms. **Polymer**, [S.l.], v. 48, n. 26, p. 7632-7644, 2007.
27. KRISHNUDU, D. M. et al. Effect of CaCO₃ filler reinforcement on PLA matrix composites fabricated through injection moulding. **Physica Scripta**, v. 99, n. 6, p. 065053, 30 maio 2024.
28. KUDRYAVTSEVA, V. L. et al. Fabrication of PLA/CaCO₃ hybrid micro-particles as carriers for water-soluble bioactive molecules. **Colloids and Surfaces B Biointerfaces**, v. 157, p. 481–489, 20 jun. 2017.
29. LIN L., DENG C., LIN G.-P., WANG Y.-Z. Super Toughened and High Heat-Resistant Poly(Lactic Acid) (PLA)-Based Blends by Enhancing Interfacial Bonding and PLA Phase Crystallization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 54, p. 5643–5655, 2015.
30. LOUZIL, Y. et al. PLA/CaO nanocomposites with antimicrobial and photodegradation properties. **Journal of Polymers and the Environment**, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 183-195, 2021.
31. LOYO, C. et al. PLA/CaO nanocomposites with antimicrobial and photodegradation properties. **Polymer Degradation and Stability**, v. 197, p. 109865–109865, 7 fev. 2022.
32. MAHAPATRA, S. Exploring the Sustainable Frontier: Green Composites Paving the Way for Eco-Friendly Innovation. **Advanced Materials Science Research**, v. 7, n. 3, p. 171–172, 24 jun. 2024.
33. MARCIO, C.; ROCHA, S. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CENTRO DE CIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

- GEOLOGIA ESTUDO QUÍMICO DE Lithothamnion sp. e Halimeda sp. NO NORDESTE BRASILEIRO FORTALEZA 2013.** [s.l: s.n.]. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/15684/1/2013_tese_cmsrocha.pdf . Acesso em: 12 dez. 2025.
34. **MARINHA DO BRASIL.** Aquicultura. **Caderno da Aquicultura - PEM NE**, 2025.
35. MASSON, T. J.; RAFAEL. RECICLAGEM DO POLIPROPILENO PARA OBTENÇÃO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM PÓ DE OSTRA. p. 40–57, 12 mar. 2021.
36. MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, Rees D. **Composite Materials: Engineering and Science.** [S. l.]: Woodhead Publishing, 1999. ISBN 0849306213.
37. MENDONÇA, C.J.S.; DA COSTA, F.R.T.; MACIEL, A.P.; MINEIRO, T.Y.; BAUER, J.R.O.; CARVALHO, E.M.; SILVA, F.C. Transesterificação do óleo de babaçu utilizando pó de conchas de ostra de mangue (*crassostrea sp*) como catalisador. IN: 57º Congresso Brasileiro de Química. Gramado, R.S, 2017.
38. MOCHAMAD ASROFI et al. Mechanical properties of biocomposite from polylactic acid and natural fiber and its application: A Review study. **Mechanical Engineering for Society and Industry**, v. 5, n. 1, p. 52–61, 3 fev. 2025.
39. NAGARAJAN V., MOHANTY A.K., MISRA M. Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 4, p. 2899–2916, 2016.
40. NURUZZAMAN, MD.; SHATHI, A. S.; YOUSUF, A.; ISLAM, MD. J.; RANA, MD. S.; ALAM, MD. S.; BISWAS, P. K.; RAHMAN, MD. A.; MONDAL, MD. I. H. Composite materials from waste plastics: A sustainable approach for waste management and resource utilization. **Polymers for Advanced Technologies**, 2025.
41. **O que são eletrônicos sustentáveis?** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://eambiental.eco.br/2023/11/10/o-que-sao-eletronicos-sustentaveis/> . Acesso em: 20 fev. 2025.
42. OEKO BIOPLÁSTICOS. **Biofilme agrícola mulching biodegradável no solo.** Disponível em: <https://oeko.com.br/loja/uso-empresarial/agricultura/agrofilme-mulch-de-bioplastico-compostavel-bobina/>. Acesso em: 13 jan. 2026.
43. OKPALA CHARLES CHIKWENDU; UDU CHUKWUDI EMEKA; EGWUAGU ONYEKACHI. The optimization of polymer-based nanocomposites for advanced engineering applications. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v.

25, n. 1, p. 755–763, 30 jan. 2025.

44. ORISEKEH, D. K.; CORTI, G.; JAHAN, M. P. Enhancing thermo-mechanical properties of additively manufactured PLA using eggshell microparticle fillers. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 133, p. 782–797, 3 dez. 2024.
45. PACHEKOSKI, W. M.; DALMOLIN, C.; AGNELLI, J. A. M. Blendas poliméricas biodegradáveis de PHB e PLA para a produção de filmes. **Polímeros**, v. 24, n. 4, p. 501-507, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/ij/po/a/ZPwDzDxCqcTkS5x3qNvkYtf/>. Acesso em: 13 jan. 2026.
46. PAVON, C. et al. Mechanical, Dynamic-Mechanical, Thermal and Decomposition Behavior of 3D-Printed PLA Reinforced with CaCO₃ Fillers from Natural Resources. **Polymers**, v. 14, n. 13, p. 2646, 29 jun. 2022.
47. PETCHWATTANA, N.; NAKNAEN, P.; NARUPAI, B. Combination effects of reinforcing filler and impact modifier on the crystallization and toughening performances of poly(lactic acid). **Express Polymer Letters**, v. 14, n. 9, p. 848–859, 2020.
48. PHAN, H. T. et al. Recycling of Waste Oyster Shells for the Treatment of Acidified Water toward Stabilization of Aquaculture Environment. **Chemical Engineering Transactions**, v. 106, p. 919–924, 2023.
49. QUEVEDO, R. T. **Calcinação - Reação química**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/quimica/calcinacao/>>. Disponível em: Acesso em: 10 dez. 2025.
50. RODRIGUES COIMBRA, M. E. **DEGRADAÇÃO DE POLI (ÁCIDO LÁCTICO), BIOVIDRO E HIDROXIAPATITA**. Acesso em: jan. 2026.
51. SANT'ANNA, F.S. Valorização dos resíduos da maricultura, Florianópolis, Santa Catarina. Projeto de Pesquisa – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
52. SENGOTTAIYAN SIVALINGAM et al. Additive Manufacturing of Metal-Infilled Polylactic Acid-Based Sustainable Biocomposites—A Review of Methods, Properties and Applications Abetted with Patent Landscape Analysis. **Polymers**, v. 17, n. 11, p. 1565–1565, 4 jun. 2025.
53. SILVA et al. Biodegradable hybrid PLA composites incorporating coffee husks and mineral fillers. **Polímeros**, v. 34, n. 3, 1 jan. 2024.

54. SOARES, B. D.; HENRIQUE, H. M.; BATISTA, C. E. A. **A sinterização no processo de calcinação do Calcário.** Disponível em: <https://br.carmeuse.com/sites/default/files/2022-08/A%20sinteriza%C3%A7%C3%A3o%20no%20processo%20de%20calcina%C3%A7%C3%A3o%20do%20Calcario.pdf> .
55. **SURAHMAN, E.**; ROHMAN, A. Manufacturing of Thermoset Composites. In: PROGRESSIVE MECHANICAL ENGINEERING UNIVERSITY, Landmark Metropolitan University, Lagos. **Manufacturing Processes for Composites**, p. 1-45, 2016.
56. SWETHA, T. A. et al. A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 234, p. 123715, fev. 2023.
57. **SYMBIOMA PROJECT (EU NPA).** Techno-Economic Feasibility Analysis of Oyster shell Valorisation. Relatório Técnico, 2021. Disponível em: [https://symbioma.interreg-npa.eu/subsites/SYMBIOMA/Oyster Shell Valorisation.pdf](https://symbioma.interreg-npa.eu/subsites/SYMBIOMA/Oyster%20Shell%20Valorisation.pdf). Acesso em: 13 jan. 2026.
58. TAZIBT, N. *et al.* Effect of filler content on the morphology and physical properties of PLA/CaCO₃ composites. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 2, p. 437, 2023.
59. **WETZEL, B.**; PÖTSCHKE, P.; BALDUS, M.; HÄUSLER, K.; ROSTAS, A. Characterization of the particle-matrix interface in rubber-modified epoxy by atomic force microscopy (AFM) and dynamic mechanical analysis (DMA). **European Polymer Journal**, v. 36, n. 12, p. 2791-2802, 2000.
60. **WILLIAMS J.G.** *The use of fracture mechanics in design.* In: **Fracture Mechanics of Polymers, Composites and Adhesives.** Woodhead Publishing, 2016, p. 281-318.
61. YANG, Z. et al. Medical Applications and Prospects of Polylactic Acid Materials. **iScience**, v. 27, n. 12, p. 111512–111512, 1 dez. 2024.
62. ZYWCZYNSKI, P.; KUNDA, T.; KUNDA, L. Micromechanisms of toughening in polymer blends and composites. In: SHONA, M. (ed.). **Toughening of plastics.** New York: Marcel Dekker, 2001. p. 289-359.