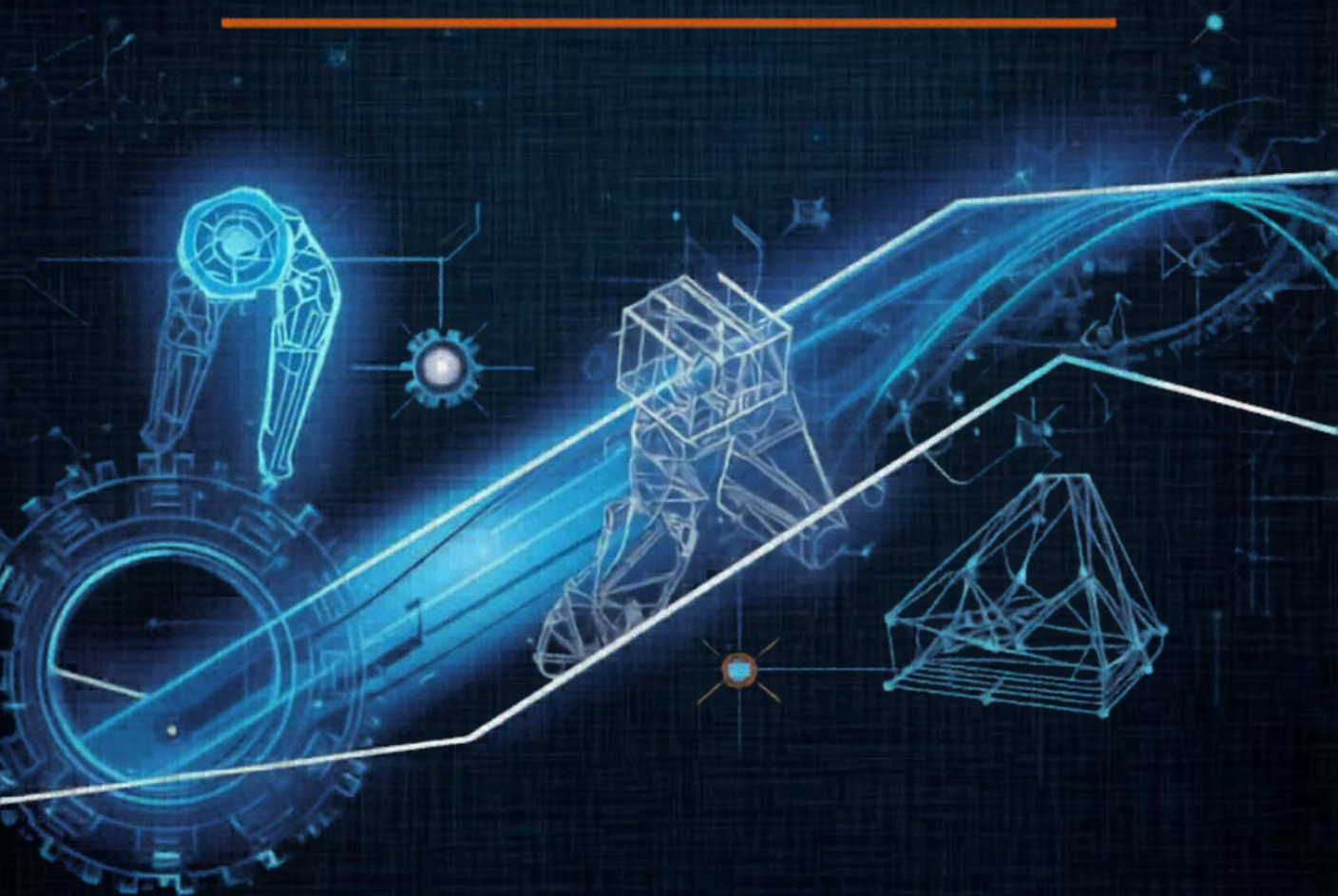


ENGENHARIAS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

As Máquinas e Soluções
que Constroem o futuro.



Frederico Barbosa (Org.)

ENGENHARIAS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: AS MÁQUINAS E SOLUÇÕES QUE CONSTROEM O FUTURO

Fiat Lux Publishing

Goiânia, GO
2026

SUMÁRIO

Capítulo 01 . APLICAÇÃO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) NA IDENTIFICAÇÃO DE FASES CRISTALINAS EM FERTILIZANTES FOSFATADOS	1
Capítulo 02 . Design Sustentável e Inovação em Materiais: Itinerário Regenerativo	23
Capítulo 03 . Estudo do efeito das variáveis do processo de moagem de alta energia na microestrutura da liga Ti-13Nb-13Zr.	42

© 2026 Fiat Lux Publishing

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, transmitida ou armazenada sob qualquer forma sem autorização prévia da editora.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico.

Engenharias, Tecnologia e Inovação: As Máquinas e Soluções que Constroem o Futuro / Frederico Barbosa (Org.). -- Goiânia, GO : Fiat Lux Publishing, 2026. 50 p.

ISBN: 978-65-5898-051-3

DOI: 10.66956/978-65-5898-051-3

Assuntos: Engenharia, Inovação, Tecnologia. I. Barbosa, Frederico. II. Título.

CDD 620 - Engenharia

APLICAÇÃO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS
X (DRX) NA IDENTIFICAÇÃO DE
FASES CRISTALINAS EM
FERTILIZANTES FOSFATADOS

Wendel Monteiro de Gois
Flávio Henrique Cunha de Moura
Cristiano Morita Barrado
Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo

Resumo: Os fertilizantes fosfatados são muito importantes para a produtividade agrícola global, pois fornecem o fósforo (P) indispensável ao crescimento das culturas. Entretanto, o uso inadequado desses insumos representa uma grave ameaça ambiental, sendo o excesso de fósforo uma das principais causas da eutrofização de corpos hídricos, degradando a qualidade da água e impactando ecossistemas aquáticos. A eficiência agrônômica e a disponibilidade de fósforo no solo estão diretamente ligadas à estrutura cristalina das fases presentes na formulação do fertilizante. Consequentemente, a identificação precisa dessas fases é muito importante, pois o padrão cristalográfico é o único indicador confiável para estimar a solubilidade do fósforo e sua cinética de liberação na matriz do solo. Para este fim é empregada a Difração de Raios X (DRX), que é uma técnica analítica primária que permite a identificação precisa das fases cristalinas, permitindo distinguir claramente compostos como fosfatos monocálcicos (característicos de superfosfato simples e triplo) e silicofosfatos (presentes em termofosfatos). O uso da DRX é essencial para a otimização do manejo, permitindo a seleção da fonte fosfatada mais adequada às condições edáficas e à demanda cultural. O conhecimento obtido por esta técnica é a base para promover uma agricultura mais sustentável e eficiente, minimizando perdas e mitigando o risco de poluição hídrica. Este trabalho apresenta uma revisão aprofundada sobre a Difração de Raios X e sua aplicação fundamental na caracterização da ciência dos fertilizantes.

Palavras-chave: Fertilizantes fosfatados; difração de raios X; estrutura cristalina; eficiência agrônômica

INTRODUÇÃO

A produção de alimentos depende da disponibilidade de nutrientes para as plantas, sendo o fósforo (P) um dos mais importantes para a produtividade agrícola moderna (REETZ, 2017; FINK et al., 2016). Este elemento desempenha funções essenciais que nenhum outro nutriente pode substituir, como o estímulo ao desenvolvimento radicular e a transferência de energia celular, visto que compõe a principal moeda energética de processos metabólicos utilizada na fotossíntese molécula, a Adenosina Trifosfato (ATP) (SASABUCHI, 2023). Ao contrário do nitrogênio, que pode ser fixado da atmosfera, o fósforo é um recurso não renovável e geograficamente concentrado em poucos países, sendo extraído de rochas fosfáticas cujas reservas de alta qualidade estão em processo de exaustão (REETZ, 2017; TAIZ; ZEIGER, 2017).

No Brasil, apesar de uma geologia abundante em diversos minerais, a produção de fertilizantes fosfatados enfrenta grandes desafios. As reservas nacionais são em

sua maioria de origem ígnea, resultando em rochas com teores de fósforo inferiores e presença de contaminantes que reduzem sua reatividade. Embora o agronegócio brasileiro seja um dos maiores *players* mundiais, liderando a exportação de diversas *commodities*, esse sucesso contrasta com a vulnerabilidade estratégica de autossuficiência deste insumo (BRASIL, 2023). O país importa cerca de 70% a 75% do fósforo consumido anualmente, dependência que coloca a segurança alimentar nacional e a balança comercial sob risco, uma vez que os preços são determinados pela volatilidade do mercado internacional e por tensões logísticas globais, como conflitos em regiões exportadoras e variações nos custos de fretes (GAMEIRO, 2025; SCHUELER, 2019).

O manejo deste nutriente é complexo na agricultura tropical brasileira. Os solos, majoritariamente ácidos e altamente intemperizados, possuem elevada capacidade de fixação de fósforo em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), o que reduz consideravelmente a eficiência da adubação convencional (TAIZ; ZEIGER, 2017; EMBRAPA, 2018). A problemática ambiental do P surge quando há uma divergência entre a solubilidade da fase cristalina do fertilizante e a demanda da cultura. Essa vulnerabilidade é agravada pela forma química com que o nutriente é aplicado, visto que, na maioria dos fertilizantes comerciais, o fósforo está presente na forma de ortofosfatos solúveis, levando ao uso excessivo de fontes altamente reativas em áreas de risco (REETZ, 2017; ZONTA et al., 2021).

O excedente de ortofosfatos, transportado por lixiviação ou escoamento superficial, torna-se o principal agente da eutrofização em ecossistemas aquáticos. Esse fenômeno desencadeia o crescimento desordenado de algas e plantas aquáticas (SOUZA, 2018), resultando na redução do oxigênio dissolvido, perda de biodiversidade, proliferação de cianobactérias e mortandade de peixes, além de elevar os custos do tratamento de água (CARNEIRO, 2018; SOUZA, 2018).

Historicamente, a eficiência dos fertilizantes tem sido avaliada apenas pelo teor total de P_2O_5 ou pela solubilidade em extratores convencionais. Contudo, como o fósforo disponível na solução do solo é mantido em níveis extremamente reduzidos, a prática convencional exige doses que superam as exigências fisiológicas das culturas (NAHAS, 1991; REETZ, 2017). Tais métodos quantitativos não revelam a complexidade estrutural do insumo, pois a reatividade e a cinética de liberação do fósforo são ditadas, fundamentalmente, pela sua fase cristalina (MACHADO, 2025). Neste cenário, a Difração de Raios X (DRX) se consolida como uma técnica analítica fundamental para a ciência do solo e a engenharia de materiais (SILVA, 2020).

Ao contrário das análises via úmida, a DRX permite a identificação qualitativa e quantitativa das fases minerais, possibilitando distinguir o arranjo atômico que define se o fósforo está retido em uma estrutura inerte ou disponível em uma fase reativa. Através do refinamento de perfis, como o Método de Rietveld, a DRX fornece informações sobre o grau de cristalinidade e a presença de fases amorfas, dados cruciais para prever a solubilidade real do fertilizante e sua interação com a mineralogia da argila, tornando-se uma ferramenta indispensável para a engenharia de materiais e a ciência ambiental (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Portanto, o trabalho propõe uma revisão sobre a aplicação da DRX na caracterização de fertilizantes fosfatados. Através de levantamento bibliográfico, é analisado os princípios da técnica, a diferenciação cristalográfica entre fertilizantes acidulados e termofosfatos, e como o conhecimento da estrutura cristalina permite um manejo agrícola sustentável, otimizando a disponibilidade do nutriente e mitigando impactos nos recursos hídricos.

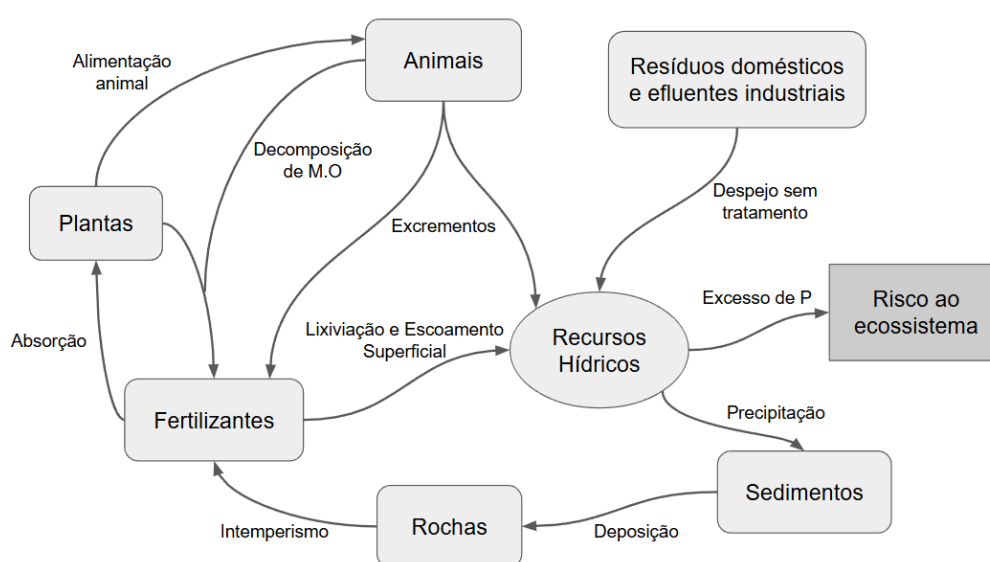
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dinâmica do fósforo no Solo

O fósforo é um elemento que apresenta uma elevada reatividade química, o que impossibilita sua ocorrência na forma elementar no ambiente natural. Ele é

trado predominantemente sob a forma de ânions ortofosfatos (PO_4^{3-}), integrando complexas estruturas minerais em rochas de origem ígnea e sedimentar. Devido à sua configuração eletrônica, o P manifesta uma acentuada afinidade geoquímica com cátions metálicos como cálcio (Ca^{2+}), ferro (Fe^{3+}) e alumínio (Al^{3+}). Essa dinâmica de interações químicas integra um fluxo contínuo de transformações bioquímicas e geofísicas entre os diversos meios na litosfera e hidrosfera (HAROLDO, 2017; HAVLIN, 2016). Conforme ilustrado na Figura 1, o ciclo biogeoquímico do Fósforo mostra a complexidade deste nutriente e as principais formas de entrada, fixação e reciclagem do elemento no ecossistema.

Figura 1 - Ciclo do Fósforo

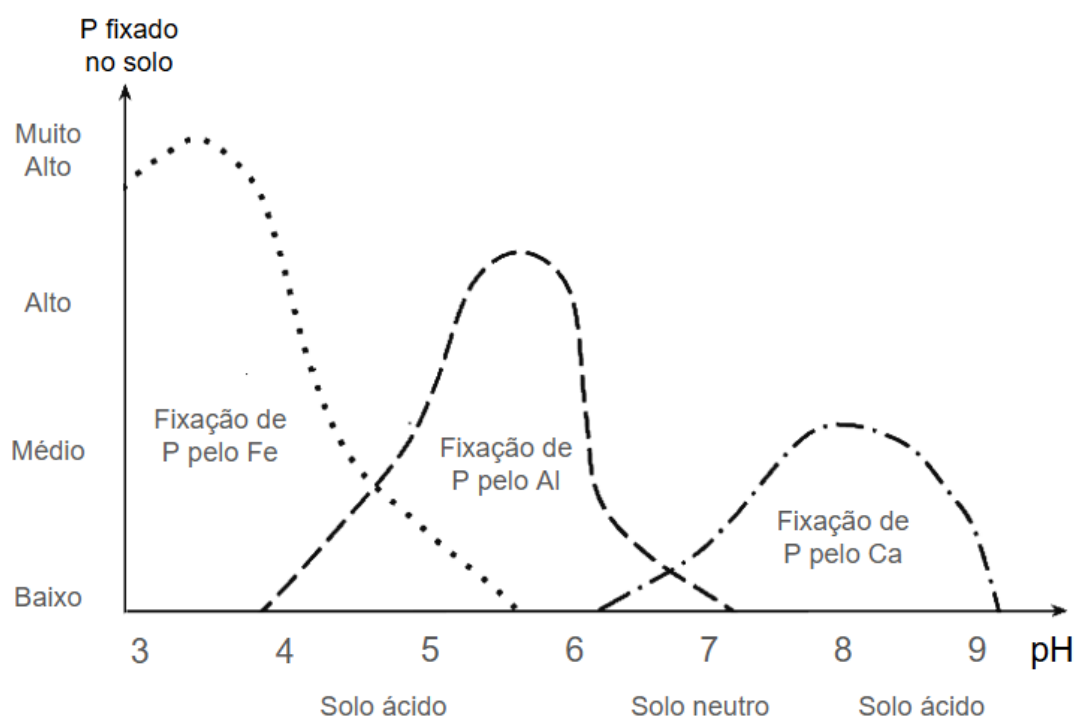


Fonte: Elaborado pelos autores

Nos solos brasileiros, classificados majoritariamente como Latossolos e Argissolos de caráter ácido e altamente intemperizados, esses metais encontram-se em abundância na fração mineralógica da argila. Eles manifestam-se principalmente

como óxidos e hidróxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita), além de argilominerais do tipo 1:1, como a caulinita. A interação entre o ortofosfato e estas superfícies minerais resulta na formação de compostos de baixíssima solubilidade, limitando drasticamente a disponibilidade do nutriente para a absorção radicular (ALEIXO, 2018; PEREIRA, 2022). Além disso, a fixação e a predominância do cátion metálico no sistema são governadas pelo índice hidrogeniônico (pH) do meio. A variação da acidez ou alcalinidade do solo altera a especiação iônica e a estabilidade dos minerais de argila, criando zonas críticas onde a disponibilidade do nutriente é severamente comprometida por processos de precipitação (BARROW, 2023; REETZ, 2017). A Figura 2 detalha essa correlação, demonstrando a relação do pH com a quantidade de fósforo fixadas pelos óxidos de ferro e alumínio em solos ácidos ou pelo cálcio em solos básicos (INPI, 2024).

Figura 2 - Influência do pH na fixação do fósforo no solo



Fonte: Elaborado pelos autores

A adsorção de P no solo ocorre primariamente por meio da precipitação química e da formação de complexos de esfera interna com os íons Fe, Al e Ca em solução. O fósforo é inicialmente retido na superfície dos colóides do solo por forças

eletrostáticas e ligações de coordenação. Com o tempo, ocorre o fenômeno da retrogradação, no qual o fósforo adsorvido difunde-se para o interior da estrutura cristalina dos colóides (CALLISTER, 2018; HAVLIN, 2016; MARQUES, 2016).

Este processo é cineticamente lento, podendo transcorrer anos até que o equilíbrio químico seja atingido, sendo o principal responsável pela redução gradual da disponibilidade de P mesmo em solos que receberam fertilização recente. Em solos com baixo histórico de adubação, as formas orgânicas de P assumem um papel protagônico no suprimento vegetal, uma vez que as frações inorgânicas encontram-se imobilizadas por processos de precipitação ou adsorção específica de alta energia (CRUZ, 2015; BRAOS, 2017).

Termodinâmica e Rede Cristalina

A complexidade do ciclo do fósforo no sistema solo-planta é agravada por sua mobilidade reduzida e interação intensa com a fase sólida. A solubilidade de qualquer composto fosfatado é consequência direta da termodinâmica de sua rede cristalina (FARIAS, 2015). Quando um fertilizante exibe uma estrutura cristalina de estabilidade alta, como a apatita original (fosfatos naturais), a energia de rede supera a energia de solvatação, resultando em uma solubilidade quase nula em condições convencionais (CRUZ, 2015; SOUSA, 2019).

Inversamente, os processos industriais de acidulação e tratamento térmico nos fertilizantes fosfatados visam a desestabilização dessas redes cristalinas robustas. O objetivo é converter minerais de alta ordem estrutural em novas fases químicas que possuam energias de ligação mais frágeis e redes mais abertas, permitindo uma solvatação eficiente e a consequente disponibilidade agronômica do fósforo (SOUSA, 2019).

Caracterização das Principais Fontes Fosfatadas

A classificação agronômica dos fertilizantes fosfatados é dividida, fundamentalmente, pelo processo de fabricação, que altera drasticamente a mineralogia do produto final.

As apatitas representam as principais fontes minerais de fósforo encontradas na natureza. Embora apresentem uma concentração bruta significativa desse elemento (entre 24 e 27 % de P_2O_5 total), sua estrutura cristalina rígida limita drasticamente a liberação imediata de nutrientes para as plantas, contudo, a solubilidade desses materiais é aumentada em meio ácido (LUZ, 2028; SOUSA, 2019).

Os superfosfatos são os fertilizantes acidulados mais utilizados na agricultura global. A síntese desses insumos baseia-se na reação da rocha fosfática, predominantemente composta por fluorapatita e ácidos minerais fortes como o sulfúrico ou fosfórico (LUZ, 2028; SCHUELER, 2019). A principal fase de interesse agrônomo resultante deste processo é o Fosfato Monocálcico Monohidratado ($[Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O]$). Do ponto de vista cristalográfico, esta fase apresenta um sistema monoclinico de cristalização, e sua elevada solubilidade em água é atribuída às ligações iônicas entre os grupamentos fosfato e o cátion cálcio, acentuada pela presença de moléculas de hidratação (LUZ, 2008; SOUSA, 2019).

Além do fosfato monocálcico, o Superfosfatos Simples (SPS) diferencia-se pela presença de Gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou Anidrita ($CaSO_4$), subprodutos da reação com o ácido sulfúrico (FARIAS, 2015). Embora essas fases não forneçam fósforo, elas exercem um papel importante ao alterar a força iônica da solução na periferia do grânulo, influenciando diretamente a cinética de difusão do nutriente para a solução do solo. Já no Superfosfato Triplo (SPT), a utilização de ácido fosfórico na acidulação torna a fase de gesso virtualmente ausente, o que resulta em uma densidade superior de fósforo por unidade de massa (LUZ, 2008; SOUSA, 2019).

Os termofosfatos constituem uma categoria de fertilizantes obtida por meio de processos térmicos, contrastando com os fertilizantes acidulados. Sua produção envolve a fusão de rocha fosfática com silicatos de magnésio, como a olivina, em temperaturas que excedem $1.500^\circ C$, seguida por um processo de resfriamento brusco. Este procedimento não objetiva a obtenção de solubilidade em água, mas a reestruturação da rede mineralógica para a formação de fases cristalinas complexas,

sendo a Silicocarnotita ($[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4]$) e a Nagelschmidtita ($[\text{Ca}_7(\text{PO}_4)_2(\text{SiO}_4)_2]$) as mais representativas (CRUZ, 2015; BRAOS, 2017; SOUSA, 2019).

Diferente das fontes aciduladas, os silicofosfatos exibem uma solubilidade gradual. Do ponto de vista cristalquímico, a introdução do íon silicato (SiO_4^{4-}) na rede cristalina ocorre por meio de uma substituição isomórfica de parte dos grupos fosfato (PO_4^{3-}). Essa arquitetura molecular resulta em uma estrutura estável em água, porém solúvel em ácidos orgânicos fracos, como os exsudatos radiculares. Agronomicamente, tal característica confere ao termofosfato um perfil de liberação controlada, o que reduz o contato imediato do fósforo livre com os óxidos de ferro e alumínio presentes na matriz do solo, mitigando drasticamente o fenômeno da quimiossorção (CRUZ, 2015; SOUSA, 2019).

Fundamentos da Difração de Raios X (DRX)

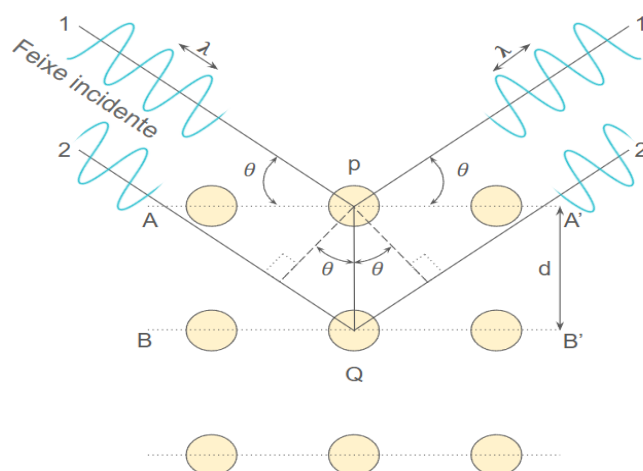
A Difração de Raios X é uma técnica analítica primária e indispensável para o estudo da matéria condensada em estado cristalino. Ela baseia-se no espalhamento da radiação eletromagnética pelos elétrons dos átomos que se encontram organizados em uma rede periódica tridimensional. Ao contrário de técnicas espectroscópicas que analisam transições eletrônicas ou vibracionais, a DRX investiga a arquitetura geométrica do material, permitindo distinguir substâncias que possuem a mesma composição química, mas diferentes arranjos espaciais (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Os raios X utilizados na difratometria de pó são radiações ionizantes de curto comprimento de onda (cerca de 0,5 a 2,5 Å), tipicamente produzidos em tubos de vácuo onde elétrons acelerados colidem contra um anodo metálico, geralmente Cobre ou Cobalto. Ao incidirem sobre um cristal de fertilizante, esses fótons interagem com os planos atômicos paralelos gerando um padrão de difração. Esta condição geométrica é estabelecida pela Lei de Bragg, expressa matematicamente na equação 1 e representada na figura 3 (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

Onde n é a ordem de difração, λ é o comprimento de onda do feixe incidente, d representa a distância entre os planos e o θ é o ângulo de incidência.

Figura 3 - Representação da Lei de Bragg



Fonte: Elaborado pelos autores

Através desta relação, a DRX permite calcular com precisão nanométrica as distâncias dentro da cela unitária do fertilizante. Como cada fase mineral possui distâncias interplanares únicas ditadas por sua estrutura atômica, a técnica permite identificar se o fósforo está contido em uma rede de fácil dissolução ou em redes estáveis e recalcitrantes (SILVA, 2020).

Preparo e Amostragem dos Fertilizantes

A qualidade de uma análise mineralógica começa no preparo rigoroso da matéria-prima, pois é necessário estabelecer protocolos práticos que respeitem as propriedades físicas do material antes mesmo de expô-la à radiação. Dessa forma, a preparação da amostra é uma etapa fundamental para assegurar que a análise seja homogênea e representativa da realidade do fertilizante (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Como as amostras sólidas frequentemente apresentam heterogeneidade em sua composição química e granulométrica, adota-se um protocolo rigoroso de padronização com técnicas de moagem fina, homogeneização, retirada de umidade e quarteamento, visando a obtenção de um pó com partículas de dimensões

uniformes que contribui na mitigação de erros experimentais, como a contaminação cruzada e variações estatísticas indesejadas. Nessa etapa é importante reduzir as partículas a uma granulometria abaixo de 45µm para garantir que os pequenos cristais percam sua orientação original e se organizem ao acaso. Essa desorientação é fundamental para que, durante a análise, o feixe de radiação encontre planos atômicos em todas as direções possíveis, assegurando uma leitura que represente fielmente a composição mineralógica de todo o lote (SILVA, 2020; MACHADO, 2025).

Análise por Difração de Raios X e Leitura Mineralógica

Após a obtenção do pó, o porta-amostra é preenchido de modo que a superfície do fertilizante fique perfeitamente plana e nivelada, sem excesso de compactação. Uma superfície irregular ou desalinhada em relação ao eixo do goniômetro pode deslocar a posição dos picos, comprometendo a identificação das fases minerais. Esse rigor no controle físico da amostra é o que permite que o feixe de raios X interaja de forma construtiva com a rede cristalina organizada do material (LIMA, 2015; SILVA, 2020).

O resultado de uma análise de DRX é o difratograma, um gráfico que correlaciona a intensidade da radiação detectada em função do ângulo de varredura (2θ). Cada mineral fosfatado produz um padrão de difração único. Para assegurar a precisão quantitativa e qualitativa do difratograma, aplicam-se padrões específicos e métodos de calibração complexos, permitindo uma leitura fiel do arranjo atômico e distinção clara das fases reativas das inertes (LIMA, 2015; SILVA, 2020).

Através da posição dos picos é possível realizar uma análise qualitativa para identificar os tipos de fosfatos presentes. Complementarmente, a intensidade desses picos permite uma mensuração quantitativa das fases, enquanto a largura do pico fornece o diâmetro médio do cristalito, fator que influencia diretamente a reatividade do insumo. Quando há uma elevação na linha de base do gráfico, também conhecida como halo de espalhamento, indica a presença de material amorfo ou fases vítreas, comuns em termofosfatos de alta eficiência (LIMA, 2015; SILVA, 2020).

Em fertilizantes tecnologicamente avançados ou misturas complexas, a interpretação torna-se um desafio devido à sobreposição de picos. Para garantir a precisão dessa interpretação, é utilizado o Método de Rietveld para o refinamento matemático dos dados, o que permite ajustar modelos teóricos aos dados experimentais e determinar com exatidão os parâmetros de rede e a porcentagem de cada fase mineral (SILVA, 2020). Este refinamento não apenas quantifica as fases cristalinas presentes, mas também permite estimar a fração amorfa, parâmetro vital para avaliar a reatividade de termofosfatos, cuja estrutura vítrea é frequentemente invisível para métodos de identificação qualitativa simples.

Dinâmica da Solubilidade e o Impacto Ambiental em corpos d'água

O problema da solubilidade chega ao seu limite quando o fósforo alcança os recursos hídricos. Nesse contexto, a poluição por fósforo em corpos hídricos deve ser analisada sob a ótica da Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, em conjunto com a Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelecem padrões rigorosos de qualidade e metas para o lançamento de efluentes, como é descrito no quadro 4 que detalhada especificamente para os limites de fósforo total em águas doces, classificados por tipo de ambiente (BRASIL, 1997; BRASIL, 2005).

Quadro 4 - Limites máximos de fósforo total em águas doces (mg/L P)

Classe de Qualidade	Ambiente Léntico (Água parada/lenta)	Ambiente Intermediário (Tempo de residência 2-40 dias)	Ambiente Lótico (Água corrente/rios)
Classe Especial	Manter condições naturais	Manter condições naturais	Manter condições naturais
Classe 1	0,020 mg/L	0,025 mg/L	0,1 mg/L
Classe 2	0,030 mg/L	0,050 mg/L	0,1 mg/L
Classe 3	0,05 mg/L	0,075 mg/L	0,15 mg/L
Classe 4	Não especificado	Não especificado	Não especificado

Fonte: Elaborado pelos autores

A correlação entre as diferentes fontes de fertilizantes, seus principais extratores (água e ácido cítrico a 2%) e as fases minerais predominantes identificadas via DRX está detalhada no quadro 5, cujos dados fundamentam a compreensão do comportamento desses insumos no sistema solo-planta (HAVLIN, 2016).

Quadro 5 - Fontes de fertilizantes e fase mineral por DRX

Fonte de Fertilizante	Fase Mineral Predominante (DRX)	Solubilidade em Água	Solubilidade em Ácido Cítrico (2%)	Comportamento no Solo
Superfosfato Triplo (SPT)	Fosfato Monocálcico Monohidratado	Altíssima (> 85%)	Alta	Disponibilidade imediata. Alta susceptibilidade à fixação inicial.
Superfosfato Simples (SPS)	Fosfato Monocálcico + Gipsita	Alta (> 70%)	Alta	Liberação rápida. O gesso auxilia na lixiviação de Al^{3+} em profundidade.
MAP / DAP	Fosfatos de Amônio (Monobásico/ Dibásico)	Altíssima	Altíssima	Alta solubilidade. Influencia o pH da rizosfera (acidificação ou alcalinização).
Termofosfatos	Silicocarnotita e Fases Vítreas	Baixíssima (< 5%)	Altíssima (> 80%)	Liberação gradual. Sincronia com a demanda da planta; Baixa fixação.
Fosfatos Naturais (Ígneos)	Fluorapatita (Cristalina)	Nula	Baixa (< 15%)	Baixíssima reatividade. Exige acidificação prévia ou longos períodos no solo.

Fonte: Elaborado pelos autores

Fertilizantes identificados via DRX como solúveis em água (fosfatos monocálcicos) geram um gradiente de concentração muito alto em curto espaço de tempo. Em solos tropicais, isso satura a solução e acelera a precipitação de minerais secundários como a Variscita ($AlPO_4 \cdot 2H_2O$) e a Strengita ($FePO_4 \cdot 2H_2O$). Do ponto de vista ambiental, a identificação cristalográfica é a melhor preditora do risco de eutrofização. Fontes que apresentam fases de liberação lenta (silicofosfatos e fosfatos dicálcicos) mantêm a concentração de P na solução abaixo do limiar crítico

de transporte por enxurrada, promovendo uma sincronia entre a mineralização do adubo e a demanda fisiológica da cultura (BRAOS, 2017; MACHADO, 2025; SILVA, 2020).

Conforme evidenciado nestes registros, fontes como o SPT e o SPS apresentam picos intensos de fosfato monocálcico no difratograma, o que se traduz em uma taxa de solubilização quase instantânea em meio aquoso. Embora essa característica atenda prontamente às culturas de ciclo curto, ela impõe um risco elevado em solos altamente intemperizados, onde o excesso de fósforo solúvel satura a solução do solo e é rapidamente sequestrada pelos óxidos de ferro e alumínio por meio da quimiossorção (CRUZ, 2015; SOUSA, 2019; SILVA, 2020).

Em contrapartida, os termofosfatos demonstram que a estabilidade estrutural não deve ser confundida com ineficiência. A identificação da fase mineral Silicocarnotita e o característico halo de espalhamento ou domo de amorfização (indicativo de fases vítreas/amorfas) garantem uma cinética de liberação governada pela interação com a rizosfera. Ao contrário das apatitas ígneas, que permanecem inertes devido à sua rede cristalina rígida, o arranjo atômico do termofosfato permite que o nutriente seja acessado seletivamente por ácidos orgânicos radiculares, consolidando como uma reserva estratégica de fósforo em solos tropicais (LIMA, 2015; MACHADO, 2025; SILVA, 2020).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho possui natureza descritiva e foi fundamentado em um levantamento de materiais bibliográficos com o intuito de explorar a conexão entre a mineralogia física e a eficiência dos fertilizantes fosfatados. O processo de construção do documento iniciou-se com a consulta em bases de dados científicas disponíveis em plataformas digitais, como: Scielo, Scopus, Science, Capes, EMBRAPA, CETEM e de universidades e escolhidas por sua relevância global e regional nas áreas de geociências, química analítica e agronomia. A estratégia de busca envolveu o cruzamento de termos como fertilizantes fosfatados, fixação de fósforo, solubilidade, cristalografia, difração de Raios X e suas variações na língua portuguesa e inglesa para garantir que os resultados refletissem a aplicação da

técnica de DRX e sua relação da identificação dos fosfatos e o manejo de fertilizantes em solos agrícolas.

Para assegurar a validade e a atualidade das discussões propostas, estabeleceu-se um recorte de pesquisas entre os anos de 2014 e 2025 redigidos em português e inglês. A seleção priorizou artigos que discutem a solubilidade do fósforo e a termodinâmica da rede cristalina, Lei de Bragg, preparação de amostras e elementos que explicam por que a especiação mineral via DRX é importante para a diferenciação de fosfatos. Após a triagem inicial de títulos e resumos, os textos foram submetidos a uma leitura analítica, onde as informações foram sintetizadas de acordo com as narrativas que conectam com o tema proposto.

Apesar da escassez de estudos detalhados sobre a arquitetura mineralógica de fertilizantes comerciais, a técnica de Difração de Raios X foi selecionada como a ferramenta central desta investigação. Tal escolha justifica-se pela capacidade do DRX em preencher lacunas deixadas por análises elementares, permitindo correlacionar a estrutura cristalina do insumo com sua dinâmica de solubilidade no solo.

RESULTADOS

A análise da literatura demonstra que a eficiência dos fertilizantes fosfatados é ditada pela estabilidade termodinâmica de suas redes cristalinas, e não apenas pelo teor elementar de nutrientes. Enquanto métodos químicos tradicionais como a Fluorescência de Raios X (FRX) que permite identificar a pureza química elementar e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) detalha a morfologia e a porosidade superficial dos grânulos, a Difração de Raios X permite observar o arranjo atômico que define a cinética de liberação do fósforo no solo. O uso predominante de fontes aciduladas, como o Superfosfato Simples, embora garanta uma disponibilidade imediata de ortofosfatos, favorece o fenômeno da quimiossorção em solos tropicais ricos em óxidos de ferro e alumínio (CRUZ, 2015). Nestes cenários, a DRX identifica a presença de fases altamente solúveis, como o fosfato monocálcico, cuja rápida dissolução satura a solução do solo e acelera a precipitação de minerais secundários inertes, reduzindo o aproveitamento pelas culturas.

Em contrapartida, as pesquisas voltadas aos termofosfatos revelam uma assinatura cristalográfica distinta, marcada pela presença de silicofosfatos e frações amorfas. O emprego do Método de Rietveld permite a quantificação precisa dessas fases vítreas que são invisíveis à identificação qualitativa simples. A literatura aponta que a presença dessas estruturas desordenadas, identificadas pelo halo de espalhamento no difratograma, é o fator determinante para a solubilidade gradual desses insumos. Essa liberação controlada, mediada pela acidez da rizosfera estabelece a oferta de nutrientes e a demanda fisiológica das plantas, mitigando o excedente de fósforo superficial, principal catalisador da eutrofização em corpos hídricos.

CONCLUSÕES

A Difração de Raios X é indispensável para a ciência dos fertilizantes moderna. Ela transpõe a barreira da análise química quantitativa para a análise estrutural qualitativa ao fazer a integração dos dados cristalográficos para um manejo agrícola com uma nutrição de precisão mineralógica. Essa integração permite monitorar a eventual formação de fases insolúveis indesejadas, como os fosfatos de ferro e alumínio em estado amorfo. Sua detecção é confiável apenas através do padrão cristalográfico obtido na DRX, distinguindo as fases reativas daquelas que permanecerão inertes no sistema solo-planta.

A precisão na identificação da estrutura cristalina e do grau de pureza das fases minerais é o alicerce para uma gestão inteligente do fósforo no campo, pois pode auxiliar na prevenção do risco ambiental ao selecionar fontes de liberação lenta para áreas de vulnerabilidade hidrológica e permite o aumento da eficiência de uso do fósforo e a preservação dos serviços ecossistêmicos aquáticos.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho é fruto de uma trajetória que contou com a colaboração da Universidade Federal de Catalão, por oferecer o suporte institucional, e ao Professor Cristiano Morita Barrado, cuja orientação foi importante para o amadurecimento desta revisão.

REFERÊNCIAS

ALEIXO, Seldon. Especiação e transformações do fósforo orgânico em solos florestais e agroflorestais na região da mata atlântica no Brasil. 2018. 93 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

BARROW, N.J. and Hartemink, A.E. (2023) The Effects of pH on Nutrient Availability Depend on Both Soils and Plants. *Plant and Soil*, 487, 21-37. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>. Acesso em: 16 dez. 2025.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 08 dez. 2025.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 08 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. Plano nacional de fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SDIC/MGI, 2023. Disponível em: . Acesso em: 10 dez. 2025.

BRAOS, L. B. Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo em solos tratados com resíduos orgânicos e relações com disponibilidade. 2017. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal Jaboticabal. DOI:

CARNEIRO, K.D., et al. Perdas de fósforo por lixiviação em neossolo regolítico adubado com esterco bovino curtido em condições semiáridas. 2018.

Disponível em:
https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/4498?locale=pt_BR. Acesso em: 10 dez. 2025.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. - 9ª ed. \ (Reimpr. \). Rio de Janeiro: LTC, 2018.

COSTA, K. S. de Q., Oliveira, C. F. de, Melo, M. P., Vaz, C. F., Melo, N. C., & Moraes, F. K. C. 2024. Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, 22(6), e5361.
Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-184>. Acesso em: 10 dez. 2025.

CRUZ, C. V. Efeito residual de fontes de fósforo e adubação fosfatada no crescimento do milho. 2015. 43f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4

FARIAS, P. I. V.. Aspectos técnicos e econômicos da indústria de fertilizantes NPK. Dissertação (Mestrado) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:
<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14819>. Acesso em: 16 dez. 2025.

FINK JR, Inda AV, Bavaresco J, Barrón V, Torrent J & Bayer C (2016) Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. Soil & Tillage Research, 155:62-68.

GAMEIRO, A. H. Vital, limitado e mal gerido: precisamos falar sobre o fósforo. Jornal da USP. 2025. Disponível em:
<https://jornal.usp.br/artigos/vital-limitado-e-mal-gerido-precisamos-falar-sobre-o-fosforo/>. Acesso em: 16 dez. 2025.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 8. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2016. 528p.

IPNI - International Plant Nutrition Institute. Homepage. International Plant Nutrition Institute, 2024. Disponível em: <http://www.ipni.net/>. Acesso em: 03 jan. 2026.

LIMA, Thiago Augustus Remacre Munareto. Síntese e caracterização de fosfatos de cálcio meso e macroporosos para sistemas de liberação controlada de fármacos. 2015. 155 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Eds.). Rochas & minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p..

MACHADO, R. P., & DORIGUETTO, A. C.. Conceitos em cristalografia estrutural: uma abordagem compreensiva da lei de bragg e do fator de estrutura. 2025. Química Nova, 48(1), e-20250064. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20250064>. Acesso em: 10 dez. 2025.

MARQUES, J. S. Adsorção de fósforo em latossolo e argissolo misturado com carbono pirolisado. 2016. 54 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2016.

NAHAS, E. Ciclo do fósforo: transformações microbianas. Jaboticabal. FUNEP, 1991. 67p.

OLIVEIRA, T. R.. Aplicação da difração de raios X associada ao método de Rietveld no beneficiamento mineral como ferramenta de caracterização mineralógica. 2019. 61 f. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2019.

PEREIRA, T. T. C., Oliveira, F. S., Freitas, D. F., Damasceno, B. D., Dias, A. C. A Mineralogia dos Solos Tropicais: Estado da Arte e Relação com o Uso e Manejo. Geonomos, 28, 1-14. 2020. Disponível em: . Acesso em: 03 jan. 2026.

REETZ, H. F. Fertilizantes e seu uso eficiente. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

Tradução: Alfredo Scheid Lopes. 45-52. Disponível em:
[https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficient e-WEB-Word-Ouubro-2017x-1.pdf](https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficient-e-WEB-Word-Ouubro-2017x-1.pdf). Acesso em: 04 dez. 2025.

SASABUCHI, I. T. M., Krieger, K. S., Nunes, R. S., Ferreira, A. C., Xavier, G. T. M., Urzedo, A. L., Carvalho, W. A., & Fadini, P. S.. (2023). SUSTENTABILIDADE NO USO DE FÓSFORO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COM FOCO NA SITUAÇÃO ATUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. Química Nova, 46(2), 185–198. . Acesso em: 16 dez. 2025.

SCHUELER, T. A. et al. Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas: o estado da arte. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019. 45 p. (Série Tecnologia Mineral, 102).

SILVA, R. F. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. Revista Processos Químicos, [s. l.], v. 14, n. 27, p. 73–82, 2020.

SOUSA, P. V. C. Diferenciação de materiais fosfáticos fertilizantes agrícolas por espectroscopia no infravermelho. 2019. 69 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2019.

SOUZA, R. A. L. (Org.). Ecossistemas aquáticos: tópicos especiais. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), 2018. 314 p. ISBN: 978-85-7295-130-2.

Disponível em:
https://portaleditora.ufra.edu.br/images/ecossistemas_aquaticos_ok.pdf. Acesso em: 10 dez. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. Porto Alegre: Artmed, 2017. 126 e 580.

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G.
Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais.
Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola,
banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá, p. 263–303,
2021.

DESIGN SUSTENTÁVEL E INOVAÇÃO EM MATERIAIS: ITINERÁRIO REGENERATIVO

Paulo Sergio de Sena
Adriano José Sorbille de Souza

Resumo

O Design Sustentável representa uma abordagem integrativa que transcende estética e funcionalidade para abordar desafios éticos, sociais e ambientais. A prática emergiu como uma resposta às crises ambientais contemporâneas, atualizando-se desde o Ecodesign dos anos 1980 até uma perspectiva regenerativa e sistêmica contemporâneas. O ensaio explora conceitos como biomateriais, biomimética, digitalização e circularidade, enfatizando o papel dos designers como agentes de transformação cultural e tecnológica. Aborda ainda metodologias regenerativas e a importância da educação em Design como catalisadores para uma sociedade mais consciente e sustentável.

Palavras-chave: *Design Sustentável; Ecodesign; biomateriais; biomimética; circularidade digital; educação em Design; regeneratividade.*

Abstract

Sustainable Design represents an integrative approach that goes beyond aesthetics and functionality to address ethical, social, and environmental challenges. This practice has emerged as a response to contemporary environmental crises, evolving from the Ecodesign of the 1980s to today's regenerative and systemic perspectives. The essay explores concepts such as biomaterials, biomimicry, digitization, and circularity, highlighting the role of designers as agents of cultural and technological transformation. It also addresses regenerative methodologies and the importance of Design education as catalysts for a more conscious and sustainable society..

Keywords: *Sustainable Design; Ecodesign; biomaterials; biomimicry; digital circularity; Design education; regenerativity.*

1 - Introdução

O conceito de sustentabilidade no Design surge como um dos pilares para o enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos. A prática transcende a estética e a funcionalidade dos produtos, transitando por questões éticas, sociais e ambientais. Superando as abordagens que objetivam reduzir impactos negativos, pensar Design Sustentável para produtos pode se ser um indutor de inovação disruptiva.

Historicamente, a integração de princípios ecológicos no Design ganhou relevância a partir dos anos 1960, quando movimentos ambientalistas começaram a questionar o modelo de produção e consumo exacerbados e seus impactos no ambiente. Papanek (1971), em sua obra ‘Design for the Real World’, criticou duramente o Design focado unicamente no mercado, afirmando que ações irresponsáveis no Design

perpetuam o desperdício e a exploração ambiental. Essa preocupação incentivou o surgimento do Ecodesign nos anos 1980, que passou a priorizar a redução de impactos ambientais por meio do uso consciente de materiais, de processos produtivos e olhando para o mercado e os hábitos de consumo dos usuários.

O Ecodesign marcou uma transição importante ao introduzir ferramentas como a análise do ciclo de vida e a eficiência energética, estabelecendo um novo paradigma. McDonough e Braungart (2002) expandiram essa abordagem com o conceito de ‘Cradle to Cradle’, enfatizando que produtos deveriam ser projetados para retornar ao sistema produtivo sem gerar resíduos. Contudo, como destacaram Manzini e Vezzoli (2008), o Ecodesign ainda era limitado em sua ênfase na mitigação de danos, abrindo caminho para o Design Sustentável, uma abordagem mais ampla e regenerativa.

O Design Sustentável emergiu como um conceito integrado, que vai além da preocupação com impactos ambientais e inclui aspectos sociais e culturais. Essa visão sistêmica busca criar soluções que promovam a regeneratividade, a circularidade e a inovação social. Sachs (2021) trouxe contribuições para o Design Sustentável, quando enfatizou a necessidade de se evitar danos socioambientais e criar impactos positivos, transformando comunidades e sistemas".

Porém, a transição para um Design mais responsável enfrenta desafios como o greenwashing e a resistência de mercados a práticas sustentáveis mais profundas. Segundo Fry (2023), a superficialidade em muitas práticas ditas sustentáveis reforça o status quo, em vez de transformá-lo. Assim, é essencial que o Design Sustentável se ancore em estratégias transparentes e cientificamente validadas.

A integração de tecnologias digitais, como inteligência artificial, gêmeos digitais e sistemas baseados em blockchain, torna o Design capaz de atuar como mecanismo de transformação socioambiental em escala. Conforme Javaid *et al.* (2022), sistemas de IA permitem otimizar fluxos produtivos, reduzir desperdícios e prever cenários, promovendo eficiência de recursos e tomada de decisão sustentável. Complementarmente, Costa *et al.* (2021) defendem que o blockchain aumenta a rastreabilidade e garante circularidade dos materiais, possibilitando ciclos fechados e reduzindo descarte inadequado. Assim, tecnologias digitais ampliam o papel estratégico do Design na construção de cadeias produtivas regenerativas e transparentes. Aproveitando as propostas de Sachs (2021), o Design deve atuar como um facilitador para a transição ecossistêmica e a equidade social, integrando soluções locais e globais.

2 - O Papel do Designer na Sustentabilidade

Os designers têm uma função estratégica na escolha de materiais, processos e formas de consumo. Para Brown (2021), os designers precisam considerar o ciclo de vida completo do produto, desde a extração de recursos até o descarte. Essa abordagem sistêmica é essencial para evitar ou minimizar impactos negativos.

Mais do que isso, o designer deve atuar como um agente de mudança cultural, incentivando comportamentos de consumo mais conscientes. Fry (2023) enfatizou que a prática do Design deve ir além do produto em si, promovendo uma reeducação dos usuários sobre o impacto de suas escolhas de consumo, um movimento de usabilidade. Essa mudança cultural requer a utilização de narrativas que conectem o Design às realidades sociais e ambientais, criando empatia e envolvimento.

Outro ponto importante é o papel do designer como mediador entre tecnologia e sustentabilidade. Conforme aponta Aita (2020), os designers têm a possibilidade de traduzir inovações tecnológicas em soluções acessíveis e sustentáveis, impactando positivamente tanto o mercado quanto o ambiente. Um exemplo prático é o uso de

biomateriais, que aliam alta performance à regeneratividade, como exemplos recentes sobre o micélio fúngico e outros compostos orgânicos (Kopp, 2024).

A neuroergonomia, numa pesquisa de Silva *et al.* (2024), trouxe outro exemplo significativo para a prática do Design no Design Sustentável. Tecnologias imersivas, como as discutidas por pesquisadores da neuroergonomia, permitem criar soluções que promovem bem-estar sem o uso de órteses, como dispositivos de realidade virtual para aliviar dores e melhorar a mobilidade de idosos. Essa abordagem une tecnologia e sustentabilidade ao reduzir a dependência de materiais físicos e focar em soluções digitais que impactam diretamente a qualidade de vida.

A integração de princípios de economia circular também destaca o papel do designer na sustentabilidade. Manzini e Vezzoli (2008), apontaram que o Design deve ser pensado como um processo iterativo que minimiza desperdícios e valoriza recursos ao longo de seu ciclo de vida. Essa abordagem exige a aplicação de tecnologias de rastreamento para garantir a efetividade do ciclo de vida dos produtos (Lazzerini, 2019).

Dessa forma, o designer contemporâneo é mais do que um criador de objetos: ele é um facilitador de mudanças culturais e tecnológicas. Ao adotar uma postura proativa e fundamentada em princípios sustentáveis, ele pode transformar os produtos que cria em elementos de relações entre consumo, produção e ambiente.

3 - Bioinovação e Design Sustentável

Uma das abordagens mais recentes é o uso de biomateriais e bioinovações no Design. Pesquisas em biotecnologia têm possibilitado a criação de materiais vivos, como micélio e algas, que reduzem o impacto ambiental e regeneram ecossistemas. Para Malshe *et al* (2023), a convergência entre Design e Biologia abre novos caminhos para produtos que coexistem com o ambiente ao invés de explorá-lo.

Para além do uso de biomateriais, a biomimética tem ganhado destaque como uma estratégia associativa no Design Sustentável. Biomimética, termo popularizado por Benyus (1997), refere-se à aplicação de princípios e processos biológicos para resolver problemas humanos. Como observou Benyus (1997), a natureza, com 3,8 bilhões de anos de experiência, oferece soluções inteligentes e sustentáveis para questões complexas. Exemplos de projetos baseados em biomimética incluem fachadas de edifícios que imitam a eficiência de ventilação de cupinzeiros e materiais que replicam as propriedades autolimpantes de folhas de lótus.

A combinação de biomimética e biotecnologia está transformando o Design de Produtos em um processo regenerativo e altamente inovador. Boratto (2024) destacaram que a associação de princípios biomiméticos com avanços em biotecnologia permite criar soluções capazes de mitigar impactos e regenerar ecossistemas, restaurando ou criando ciclos de vida sustentáveis.

A bioinovação está se consumando como uma tendência e um passo necessário para um futuro sustentável. Manzini e Vezzoli (2008), entenderam que o Design Sustentável deve abraçar a complexidade dos sistemas vivos, utilizando a bioinovação como uma ponte entre tecnologia e sustentabilidade. O uso de biomateriais, aliado ao estudo de soluções naturais por meio da biomimética, representa um dos caminhos promissores para o efeito inovador e disruptivo do Design contemporâneo.

4 - Estratégias de Circularidade e Digitalização

Dentre as estratégias de sucesso destacadas pelo Ecodesign foi o movimento de priorizar materiais recicláveis e métodos de produção limpa. Papanek (2022) argumentou

que todo Design deve ser responsável pelo impacto gerado no ambiente e na sociedade. Essa abordagem conecta-se diretamente ao conceito emergente de circularidade digital, que une a economia circular, a revolução digital e o Design Sustentável.

A circularidade digital envolve o uso de tecnologias para rastrear e otimizar os ciclos de vida dos produtos, garantindo sua reutilização e reduzindo desperdícios.

‘Blockchain’, por exemplo, tem se destacado como uma ferramenta para promover a transparência e a rastreabilidade nos processos produtivos. Costa *et al* (2021), propuseram que o ‘blockchain’ pode otimizar a economia circular, permitindo que designers planejem produtos que nunca se tornem lixo. Essa tecnologia também facilita a criação de sistemas de logística reversa eficientes, incentivando a responsabilidade compartilhada entre produtores e consumidores.

Nessa toada, a aplicação de inteligência artificial (IA) na gestão de recursos tem se mostrado um diferencial significativo. Como apontaram Javaid *et al* (2022), que a IA permite prever demandas, otimizar processos e minimizar perdas, contribuindo para a criação de cadeias produtivas mais sustentáveis e interconectadas. Essa integração de dados também possibilita a personalização em larga escala, promovendo o consumo consciente e reduzindo estoques excessivos.

Outro exemplo relevante é o conceito de gêmeos digitais, que permite simular digitalmente o ciclo de vida de produtos e sistemas antes de sua implementação. Na leitura de Lopes (2022), esses gêmeos digitais oferecem uma plataforma para testar soluções sustentáveis em ambientes virtuais, reduzindo custos e desperdícios associados a processos tradicionais de desenvolvimento.

As estratégias de circularidade e digitalização firmam-se como pilares essenciais do Design Sustentável contemporâneo. Ao integrar tecnologias inovadoras com princípios sustentáveis, essas abordagens reduzem os impactos ambientais e impulsionam novas soluções para transformar a economia global.

5 - Metodologias Regenerativas no Design

O Design Sustentável, no caminho das abordagens mitigadoras para práticas efetivamente regenerativas, requer metodologias capazes de orientar a tomada de decisão sobre materiais, processos e impactos sistêmicos. Nesse sentido, pensar metodologias regenerativas implica aplicar conceitos ecológicos e estruturar ferramentas que auxiliem o designer a mensurar, comparar e justificar a seleção de materiais e tecnologias. Drew, Winhall e Robinson (2022) reforçaram que uma intervenção regenerativa deve devolver ao ecossistema mais do que retira; portanto, a seleção de materiais precisa considerar o potencial restaurativo, a circularidade e a capacidade de reintegração ambiental.

Para contextualizar essa seleção no horizonte teórico, se apresenta, inicialmente o Quadro 1, que sintetiza as principais contribuições conceituais relacionadas ao design regenerativo. Essa tabela estabelece um quadro de referência que permite compreender quais dimensões regenerativas (biomateriais, tecnologias, sistemas ecológicos, inovação cultural) podem ser ativadas na análise de um produto ou solução projetual. Assim, ela funciona como mapa conceitual, orientando a leitura crítica dos casos e situando as escolhas de materiais dentro das correntes teóricas contemporâneas.

Tema/Conceito	Principais Contribuições	Autores
Design Regenerativo	Vai além da redução de danos; busca regenerar ambientes e comunidades.	Sena (2025)
Metodologias Regenerativas	Produtos e espaços devem devolver mais ao ecossistema do que retirar;	Drew, Winhall; Robinson (2022)

	infraestruturas verdes e soluções urbanas.	
Aplicações em Produtos e Sistemas	Neutraliza impactos negativos e cria condições para prosperidade de ecossistemas e comunidades.	Cheshire (2024)
Biomateriais Regenerativos	Regeneram solos e habitats	Laguna, Mangui; Ullua (2022)
Tecnologias Emergentes	Sensores inteligentes e big data para prever impactos; realidade aumentada para visualizar cenários regenerativos.	Khanna (2021)

Quadro 1 – Metodologias Regenerativas no Design

Fonte: dos autores (2025)

Partindo desse quadro referencial, a aplicação prática dos princípios regenerativos no Design de Produtos e Sistemas deve considerar a capacidade de cada material ou processo gerar impactos positivos. Como argumentou Cheshire (2024), o design regenerativo busca criar condições para que ecossistemas e comunidades prosperem, o que significa que a seleção de materiais não pode se limitar à baixa toxicidade ou à reciclabilidade, mas deve envolver aspectos como regeneração de solos, captura de carbono, restauração biológica e reintegração natural ao final do ciclo de vida.

Nesse ponto, o Quadro 2 cumpre um papel metodológico central: ela estabelece critérios objetivos (rubricas) e uma escala de avaliação (1–3) para mensurar o grau de regeneratividade de um produto ou material. A ferramenta permite estudos com análise comparada e estruturada, avaliando impacto ambiental, ciclo de vida, biomimética, inovação regenerativa, tecnologias envolvidas e impactos sociais. Ao utilizar essa ferramenta, é possível identificar lacunas, potencialidades e caminhos de melhoria para a seleção de materiais mais regenerativos.

Critério	Indicadores de Avaliação	Níveis (Escala 1–3)
Impacto Ambiental	Uso de materiais renováveis, recicláveis ou regenerativos (micélio, algas, biomateriais); <u>redução de resíduos: circularidade.</u>	1 = Produto linear, gera resíduos 2 = Produto parcialmente reciclável 3 = Produto totalmente regenerativo, sem resíduos
Ciclo de Vida	Avaliação completa do ciclo de vida (extração → descarte); logística reversa e rastreabilidade (blockchain, IA).	1 = Sem rastreabilidade 2 = Ciclo parcialmente mapeado 3 = Ciclo fechado com rastreamento digital
Inovação Regenerativa	Capacidade de restaurar ecossistemas e comunidades (ex.: telhados verdes, reintrodução de vegetação nativa, agroecologia urbana).	1 = Mitiga impactos 2 = Reduz danos + pequenas ações restaurativas 3 = Restaura e gera prosperidade socioambiental
Tecnologias Sustentáveis	Aplicação de IA, gêmeos digitais, sensores e RA para prever, simular e otimizar impactos.	1 = Sem uso de tecnologia 2 = Uso parcial (otimização pontual) 3 = Tecnologias plenamente integradas à <u>regeneratividade</u>
Dimensão Social e Cultural	Contribuição para inovação social, equidade, engajamento comunitário e mudança cultural de consumo.	1 = Sem impacto social 2 = Apoio indireto à comunidade 3 = Transformação social e cultural positiva
Biomimética	Inspiração em processos naturais para soluções regenerativas	1 = Nenhum uso 2 = Uso limitado 3 = Biomimética como princípio central do <u>produto</u>

Quadro 2 – Ferramenta de Análise: Grau de Regeneratividade de um Produto

Fonte: dos autores (2025)

Essa abordagem se torna relevante no contexto da adoção de biomateriais regenerativos, como indicaram Laguna, Mangui e Ullua (2022), que destacaram o papel do micélio, das algas e de compósitos biológicos na restauração de solos e habitats. A análise sistemática destes materiais por meio do Quadro 2 permite compreender como cada um contribui para os objetivos regenerativos do projeto e como se comporta ao longo do ciclo completo.

As metodologias regenerativas contemporâneas dependem cada vez mais de tecnologias emergentes, como sensores ambientais, gêmeos digitais e análise de big data (Khanna, 2021), que ampliam a capacidade de prever comportamentos ecológicos e de simular cenários de impacto. Tais tecnologias auxiliam diretamente na avaliação dos critérios, especialmente aqueles relacionados ao ciclo de vida e inovação regenerativa, tornando a seleção dos materiais mais fundamentada e alinhada a evidências.

Para complementar esse processo, o Quadro 3 oferece uma visão conceitual da sustentabilidade no design, lastreando cada decisão sobre materiais dentro de um continuum histórico que vai do Ecodesign às abordagens regenerativas. Essa perspectiva é essencial para que o pesquisador compreenda em qual estágio de maturidade sustentável o material selecionado se encontra: se ainda está na fase de redução de danos, na circularidade ou já incorpora princípios regenerativos.

Tema/Conceito	Principais Contribuições	Autores
Sustentabilidade no Design	Integra estética, funcionalidade, ética, aspectos sociais e ambientais; motor de inovação disruptiva.	Sachs (2021)
Origens (anos 1960–70)	Críticas ao consumo exacerbado e ao Design voltado apenas ao mercado; defesa de responsabilidade social e ambiental.	Papanek (1971)
Ecodesign (anos 1980–2000)	Introdução de ferramentas como Análise do Ciclo de Vida (ACV) e eficiência energética; foco na redução de impactos.	McDonough; Braungart (2002); Manzini; Vezzoli (2008)
Cradle to Cradle	Produtos concebidos para retornar ao sistema produtivo sem gerar resíduos.	McDonough; Braungart (2002)
Design Sustentável	Visão sistêmica: regeneratividade, circularidade, inovação social; impacto positivo em comunidades.	Manzini; Vezzoli (2008); Sachs (2021)
Críticas e Desafios	Greenwashing e superficialidade que reforçam o status quo; necessidade de base científica e transparente.	Fry (2023)
Papel do Designer	Considerar o ciclo de vida dos produtos; atuar como agente cultural e mediador entre tecnologia e sustentabilidade.	Brown (2021); Fry (2023); Aita (2020)
Exemplos Tecnológicos	Uso de biomateriais (micélio, algas), inovação em neuroergonomia e tecnologias imersivas.	Kopp (2024); Silva et al. (2024)
Economia Circular	Minimização de desperdícios, rastreamento de ciclos de vida, logística reversa.	Manzini; Vezzoli (2008); Lazzerini (2019)
Bioinovação	Materiais vivos, biomateriais regenerativos, integração Design-Biologia.	Malshe et al. (2023); Boratto (2024)
Biomimética	Aplicação de princípios da natureza para soluções humanas sustentáveis.	Benyus (1997)
Circularidade Digital	Integração de economia circular com tecnologias digitais; rastreabilidade via blockchain.	Papanek (2022); Costa et al. (2021)
Inteligência Artificial	Gestão otimizada de recursos, previsão de demandas, consumo consciente.	Javaid et al. (2022)

Quadro 3 – Sustentabilidade no Design, síntese conceitual

Fonte: dos autores (2025)

Assim, em síntese, a integração dessas três ferramentas (Tabelas 1, 2 e 3) transforma este item em uma metodologia operacional para orientar estudos sustentáveis de seleção de materiais, articulando:

1. **Fundamentação conceitual** (Tabela 1) – para compreender o que caracteriza uma abordagem regenerativa.
2. **Ferramenta analítica** (Tabela 2) – para avaliar o grau de regeneratividade de cada material ou produto.
3. **Enquadramento histórico-conceitual** (Tabela 3) – para posicionar cada solução dentro da trajetória da sustentabilidade.

A convergência entre teoria, mensuração e contexto fortalece o rigor do estudo e permite que as seleções projetuais sejam justificadas de maneira clara, transparente e alinhada às expectativas contemporâneas de regeneração ecológica e social. Dessa forma, o design regenerativo deixa de ser um ideal abstrato e transforma-se em um procedimento prático, avaliável e replicável, capaz de orientar decisões sobre materiais em projetos sustentáveis com precisão teórica-metodológica.

6 - Educação e Consciência Sustentável

Promover uma mudança no Design requer também um enfoque educacional. Iniciativas recentes têm mostrado o impacto de programas que ensinam designers a pensar em sistemas e comunidades.

Moraes (2023) propôs que a educação para o Design com sustentabilidade deveria integrar princípios éticos, sistemas complexos e inovações tecnológicas desde o início da formação acadêmica. Para Moraes, Necyk e Martins (2024), a implementação de metodologias de aprendizado baseadas em problemas e desafios reais permite que futuros designers compreendam profundamente as dinâmicas sociais e ambientais.

A educação também tem explorado o uso de tecnologias imersivas, como realidade virtual, para simular cenários sustentáveis. Segundo Cho e Park (2023), essas ferramentas oferecem experiências práticas e interativas, permitindo que estudantes testem soluções sustentáveis em ambientes virtuais antes de aplicá-las no mundo real.

Outro aspecto relevante é a colaboração entre universidades e indústrias, que tem se mostrado promissor para integrar a sustentabilidade à prática profissional. Conforme relataram Mejía *et al* (2023), de que projetos interdisciplinares que envolvem estudantes, pesquisadores e profissionais do setor produtivo promovem uma compreensão mais ampla e aplicável do Design e por consequência, sua prática Sustentável.

Essas iniciativas educacionais formam profissionais capacitados para contribuir para uma sociedade mais consciente sobre a importância do Design como ferramenta para a sustentabilidade.

7 – Resultados e Discussão - Estudo Aplicado

O conceito de sustentabilidade no Design exige a consideração de todo o ciclo de vida de um produto, envolvendo desde a extração de matérias-primas à manufatura, uso, descarte e potencial de regeneração ambiental. No contexto contemporâneo, essa abordagem não se limita à mitigação de impactos e passa a integrar princípios regenerativos, nos quais o designer atua como agente de transformação ao selecionar materiais, processos e tecnologias capazes de reduzir danos, prolongar a vida útil dos sistemas e promover novos ciclos positivos de valor. Isso inclui o uso de biomateriais,

bioinovações, manufatura aditiva e ferramentas digitais avançadas para fundamentar decisões, alinhando funcionalidade, segurança clínica e responsabilidade socioambiental.

Na área biomédica, especialmente na ortopedia, tais decisões se tornam ainda mais críticas, porque os materiais utilizados em implantes precisam atender simultaneamente a elevado desempenho mecânico, alta biocompatibilidade, resistência à fadiga, baixa degradação química e mínima geração de resíduos tóxicos. As próteses empregadas na Artroplastia Total de Quadril (ATQ) (Figura 1) representam um caso emblemático dessa complexidade. Anualmente, mais de um milhão de cirurgias de ATQ são realizadas no mundo, mas cerca de 30% das próteses falham em pacientes abaixo de 50 anos após aproximadamente 15 anos de uso, devido a fatores como desgaste tribológico, tensões acumuladas, liberação de debris metálicos ou poliméricos e respostas biológicas adversas no tecido ósseo.

Figura 1 – Representação esquemática da Artroplastia Total de Quadril



Fonte: Souza (2010)

Esses desafios reforçam a importância de integrar o Design Sustentável ao processo de tomada de decisão. É nesse ponto que ferramentas analíticas como o Método dos Elementos Finitos (MEF) se tornam essenciais: elas permitem prever com precisão as tensões, deformações, hotspots e zonas de desgaste, fornecendo subsídios técnicos para comparar diferentes ligas metálicas, cerâmicas e polímeros antes mesmo de sua fabricação. A partir dessa análise, o designer pode selecionar materiais que garantam desempenho estrutural superior e reduzam a geração de resíduos cirúrgicos, aumentem a vida útil da prótese e diminuam a necessidade de cirurgias de revisão, impactando diretamente a sustentabilidade do sistema de saúde.

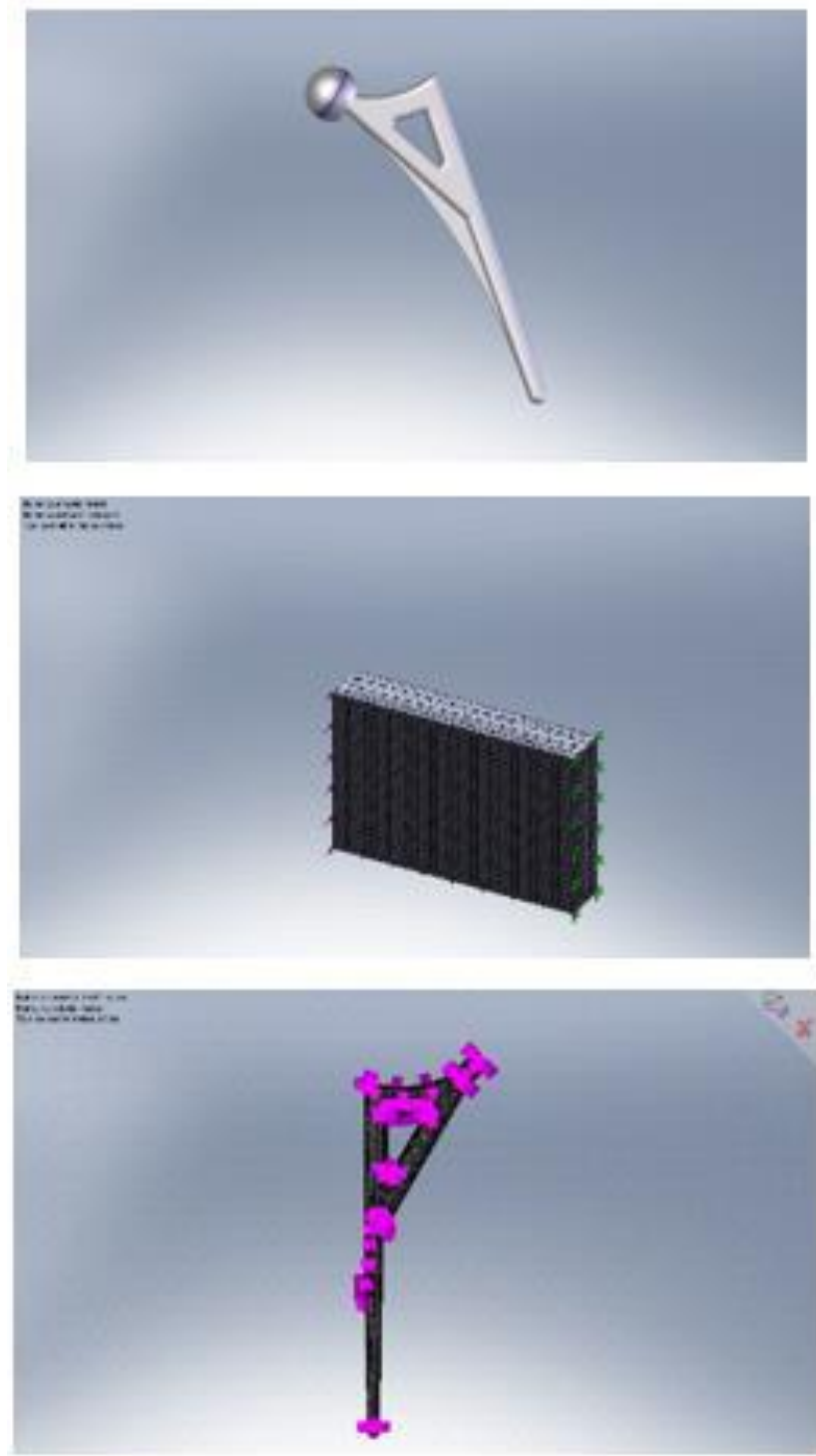
O estudo aplicado investiga como a escolha dos materiais na Artroplastia Total de Quadril (ATQ) influencia tanto o desempenho mecânico quanto os impactos ambientais, sociais e regenerativos. Para isso, utilizou-se uma combinação entre simulação computacional por Método dos Elementos Finitos (MEF) e uma avaliação regenerativa dos materiais, permitindo uma análise integrada e multidimensional das próteses ortopédicas.

A ATQ é um procedimento realizado globalmente, e problemas como desgaste, geração de debris e afrouxamento asséptico continuam sendo desafios clínicos relevantes. Para contextualizar, apresenta-se uma representação esquemática do procedimento cirúrgico.

Para compreender os esforços suportados pelos implantes, foi empregado o MEF, que permite simular tensões, deformações, desgaste e riscos de falha, reduzindo testes físicos e acelerando decisões de projeto. A modelagem CAD gerada durante o estudo

também deve ser mantida para coerência visual do processo (Figura 2).

Figura 2: Modelos de desenhos confeccionados no software de CAD



Fonte: Souza (2010)

A Figura 2 apresenta os modelos tridimensionais da prótese de quadril gerados no software de CAD, bem como as respectivas malhas utilizadas para a simulação computacional no Método dos Elementos Finitos (MEF). Nela, observam-se a haste femoral, a cabeça modular e o copo acetabular discretizados em elementos tetraédricos, com refinamentos específicos nas regiões de maior concentração de tensões, como o pescoço da prótese e a interface cabeça–liner. Essa representação visual demonstra como

a geometria, as propriedades dos materiais e as condições de contorno são incorporadas ao modelo numérico, tornando possível prever deformações, hotspots de tensão, comportamentos tribológicos e potenciais zonas de desgaste. Assim, a Figura 2 evidencia a base técnica do estudo aplicado, mostrando que a análise estrutural e as decisões sustentáveis discutidas posteriormente derivam diretamente dessa modelagem e discretização computacional.

O software paramétrico utilizado gera malhas confiáveis com elementos tetraédricos e triangulares. Elementos de segunda ordem, devido à sua maior precisão, são preferíveis para análises complexas. A correta interpretação dos resultados é crucial para avaliar a segurança estrutural, sendo as tensões de Von Mises e as tensões principais parâmetros comuns nessa análise (Souza, 2010).

O Quadro 4 apresenta o *pipeline* completo do Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicado ao estudo das próteses de quadril, organizando de forma sistemática todas as etapas que compõem o processo de análise estrutural. O quadro sintetiza desde o pré-processamento — no qual são definidas a geometria CAD, as propriedades dos materiais e as condições de contorno — até as fases de discretização, solução numérica, pós-processamento e validação. Para cada etapa, a tabela explicita os objetivos, parâmetros de entrada, métricas de saída e decisões projetuais derivadas, indicando também os benefícios sustentáveis associados, como redução de prototipagem física, menor geração de resíduos e aumento da vida útil prevista dos implantes. Dessa forma, a Tabela 4 funciona como uma ferramenta metodológica central do estudo aplicado, evidenciando como o MEF orienta escolhas de materiais e otimizações que integram desempenho mecânico e sustentabilidade no design ortopédico.

Etapa (MEF)	Objetivo	Entradas/ Parâmetros	Saídas/ Métricas	Decisões de Design	Benefícios Sustentáveis
Pré-processamento	Definir o problema estrutural sob cargas fisiológicas.	Geometria CAD (haste, cabeça, copo acetabular); propriedades: 316L, Co-Cr-Mo, Ti-6Al-4V, UHMWPE, cerâmicas; condições de contorno; contato; coef. de atrito.	Relato de malha (qualidade, tamanho); casos de carga; validação da configuração.	Escolha de materiais candidatos; seleção de contatos (deslizante, acoplado); definição de rugosidades para simular desgaste.	Reduz tentativas/erros; evita protótipos físicos iniciais.
Malha (discretização)	Garantir precisão com custo computacional controlado.	Elementos tetraédricos de 2ª ordem; refinamentos em regiões críticas (pescoço, interface cabeça-copo).	Indicadores de qualidade da malha; independência de malha.	Tamanho de elemento ótimo; refinamento adaptativo.	Menos simulações redundantes → menor consumo energético.
Solução		Calcular campos de tensão/deformação por carga estática e cíclica.	Solver não linear (contato); cargas de marcha (pico ~3×peso corporal); ciclos representativos (fadiga).	Tensão de Von Mises, principais; deslocamentos; história de ciclos; hotspots.	Ajuste de espessuras, raios e concordância e folgas; escolha de liga com melhor resistência.

Etapa (MEF)	Objetivo	Entradas/ Parâmetros	Saídas/ Métricas	Decisões de Design	Benefícios Sustentáveis
Pós-processamento	Interpretar resultados para risco de falha, desgaste e corrosão assistida por tensão.	Mapas de tensão/deformação; pressão de contato e energia dissipada.	Fator de segurança local; pressão média no par tribológico; estimativa qualitativa de debris.	Troca de par de atrito (cerâmica-cerâmica, cerâmica-UHMWPE); otimização topológica.	Reduz retrabalho e revisões cirúrgicas futuras.
Validação/sensibilidade	Testar robustez a variações de material e carga.	Variação $\pm 10-20\%$ em módulo, limite de escoamento e atrito; diferentes ângulos de implantação.	Faixas de resposta; casos de pior cenário.	Definição de tolerâncias de fabricação; especificação de superfície.	Projeto mais robusto $\rightarrow$ menor descarte e desperdício.

Quadro 4. Pipeline do Método dos Elementos Finitos MEF e Decisões de Projeto

Fonte: Souza (2010)

O Quadro 5 sintetiza os *resultados qualitativos por material* obtidos a partir das simulações realizadas com o Método dos Elementos Finitos (MEF), permitindo comparar o comportamento estrutural das principais ligas metálicas, polímeros, cerâmicas e biomateriais analisados neste estudo. O quadro organiza informações sobre hotspots de tensão, fatores de segurança, pressão de contato, risco de geração de debris e propensão à corrosão, traduzindo a interpretação dos mapas de tensões e das respostas tribológicas obtidas no modelo computacional. Essa síntese evidencia que cada material apresenta um perfil estrutural distinto: ligas como o aço 316L exibem concentrações elevadas de tensão em regiões críticas, enquanto Ti-6Al-4V demonstra melhor equilíbrio entre rigidez e biocompatibilidade; já cerâmicas apresentam baixíssimo desgaste, mas maior fragilidade a choques. Ao consolidar essas diferenças, o Quadro 5 funciona como uma ferramenta comparativa essencial, orientando decisões de design e seleção de materiais em uma perspectiva que integra desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade no

Material	Hotspots de Tensão qualitativo	Fator de Segurança qualitativo	Pressão de Contato / Desgaste	Risco de Debris	Risco de Corrosão	Decisão sugerida pelo MEF
Aço inox 316L	Moderado–alto no pescoço e junções	Médio	Moderado	Moderado	Moderado	Preferir fillets maiores; avaliar substituição por Ti-6Al-4V.
Co-Cr-Mo	Baixo–moderado (alta rigidez)	Alto	Baixa*	Moderado/alto	Moderado/alto	Usar com cerâmica/UHMWPE de alto desempenho; controlar acabamento.
Ti-6Al-4V	Baixo–moderado (bom compromisso)	Alto	Moderado	Baixo	Baixo	Material preferencial da haste; otimizar topologia para reduzir massa.

contexto das próteses ortopédicas.

Material	Hotspots de Tensão qualitativo	Fator de Segurança qualitativo	Pressão de Contato / Desgaste	Risco de Debris	Risco de Corrosão	Decisão sugerida pelo MEF
UHMWPE (liner)	Hotspots no contato com cabeça	—	Alto desgaste se contato mal distribuído	Alto	Baixo	Aumentar diâmetro da cabeça; otimizar espessura do liner.
Cerâmica (Al₂O₃/ZrO₂)	Baixo nas cabeças; atenção a choques	Alto	Muito baixo desgaste	Muito baixo	Baixo	Par cerâmica-cerâmica ou cerâmica-UHMWPE de alta qualidade.

* risco tribocorrosão

Quadro 5. Resultados Qualitativos por Material (a partir do MEF)
Fonte: dos autores (2025)

Os Quadros 6^a e 6^b apresentam a *Ferramenta para Análise Regenerativa dos Materiais em Próteses Ortopédicas*. Avaliação tecnoambiental e de ciclo de vida dos materiais e Avaliação sociotécnica, inovação e biomimética dos materiais, respectivamente, consolidando os resultados finais do estudo ao avaliar cada material pelo seu desempenho mecânico, sua contribuição ambiental, social e regenerativa. A matriz organiza seis dimensões centrais: impacto ambiental, ciclo de vida, inovação regenerativa, tecnologias sustentáveis, dimensão sociocultural e biomimética; permitindo uma leitura abrangente da sustentabilidade de cada material utilizado em implantes ortopédicos. A partir dessa análise, se registra que materiais convencionalmente adotados, como aço inoxidável 316L, Co-Cr-Mo e UHMWPE, apresentam limitações significativas relacionadas à geração de debris, difícil reciclagem e ausência de atributos regenerativos, apesar do bom desempenho estrutural. Em contraste, biomateriais regenerativos derivados de micélio, algas e compósitos bioativos despontam como alternativas promissoras, apresentando pontuação máxima em todas as dimensões avaliadas. Dessa forma, os Quadros 6^a e 6^b sintetizam o avanço metodológico do estudo, revelando que a sustentabilidade em próteses ortopédicas depende de uma integração entre desempenho biomecânico (avaliado pelo MEF) e capacidade regenerativa, oferecendo ao designer clínico um instrumento decisório para orientar seleções de materiais mais responsáveis, duráveis e alinhadas ao futuro do design biomédico.

Quadro 6a. Ferramenta para Análise Regenerativa dos Materiais em Próteses Ortopédicas –
Avaliação tecnoambiental e de ciclo de vida dos materiais

Material	Impacto Ambiental	Ciclo de Vida	Observações Técnicas
Aço inoxidável 316 (ASTM F-138)	2 – Reciclável, mas alto gasto energético	2 – Parcialmente rastreável; desgaste gera resíduos metálicos	Amplamente usado, mas gera debris prejudiciais.
Liga Co-Cr-Mo (ASTM F-75, F-799)	2 – Alta durabilidade, mas difícil reciclagem	2 – Resistência, mas partículas liberadas são tóxicas	Bom desempenho mecânico, mas alto impacto biológico.
Liga Co-Ni-Cr-Mo (ASTM F-562)	2 – Boa resistência, mas extração mineral impactante	2 – Ciclo com riscos de corrosão	Melhor resistência à fadiga, mas ainda com problemas de debris.
Titânio puro (ASTM F-67)	3 – Alta biocompatibilidade, reciclável	3 – Longa vida útil, baixa corrosão	Um dos mais sustentáveis entre os metais.
Liga Ti-6Al-4V (ASTM F-136)		3 – Boa rastreabilidade e longa vida	Padrão ouro atual em implantes.

Material	Impacto Ambiental	Ciclo de Vida	Observações Técnicas
UHMWPE	2 – Polímero não biodegradável, reciclabilidade limitada	2 – Desgaste gera debris inflamatórios	Reduz atrito, mas crítico na geração de partículas.
Cerâmicas (Al_2O_3 , ZrO_2)	3 – Inertes, não liberam resíduos tóxicos	3 – Longa vida útil, baixa degradação	Excelente biocompatibilidade, porém frágeis em impacto.
Biomateriais regenerativos	3 – Renováveis e biodegradáveis	3 – Ciclo fechado e rastreável	Futuro promissor para próteses regenerativas.

Fonte: dos autores (2025)

Quadro 6b. Ferramenta para Análise Regenerativa dos Materiais em Próteses Ortopédicas – Avaliação tecnoambiental e de ciclo de vida dos materiais

Material	Inovação Regenerativa	Tecnologias Sustentáveis	Dimensão Social e Cultural	Biomimética
Aço inoxidável 316 (ASTM F-138)	1 – Mitiga, não regenera	2 – Produção + simulações reduzem protótipos	2 – Durabilidade melhora acesso, mas há revisões	1 – Nenhuma
Liga Co-Cr-Mo	1 – Mitiga, sem regeneração	2 – MEF auxilia otimização	2 – Aumenta sobrevida, mas gera novas cirurgias	1 – Não biomimético
Liga Co-Ni-Cr-Mo	1 – Sem regeneração	2 – Testes avançados reduzem falhas	2 – Acesso limitado pelo custo	1 – Não biomimético
Titânio puro	2 – Mitiga e reduz falhas	3 – Impressão 3D personalizável	3 – Alta aceitação e qualidade de vida	2 – Biocompatível
Liga Ti-6Al-4V	2 – Inovação em durabilidade	3 – CAD/MEF + manufatura aditiva	3 – Personalização e bem-estar	2 – Biocompatível
UHMWPE	1 – Mitiga, não regenera	2 – Simulações melhoram desempenho	2 – Populariza cirurgias	1 – Não biomimético
Cerâmicas	2 – Prolongam sobrevida	3 – Tecnologias avançadas	3 – Reduzem revisões cirúrgicas	2 – Inspiradas em propriedades naturais
Biomateriais regenerativos	3 – Regeneram tecidos	3 – Biofabricação + biotecnologia	3 – Equidade e personalização	3 – Inspirados na natureza

Fonte: dos autores (2025)

Os resultados obtidos no estudo aplicado permitem compreender como a seleção de materiais e o comportamento estrutural das próteses ortopédicas se articulam diretamente com os princípios do Design Sustentável e Regenerativo. A análise realizada por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) evidenciou diferenças estruturais marcantes entre ligas metálicas, polímeros, cerâmicas e biomateriais, permitindo aprofundar o debate à luz do referencial teórico. Nesse sentido, as contribuições de Drew, Winhall e Robinson (2022) tornaram-se centrais, pois os autores defenderam que sistemas projetados devem gerar impactos positivos ao ecossistema, e não apenas reduzir danos, o que orienta a interpretação dos resultados estruturais para além da performance técnica. Cheshire (2024) contribuíram ao enfatizar que o design regenerativo deve criar condições para a prosperidade ecológica e social, o que permite avaliar como diferentes materiais, mesmo quando robustos mecanicamente, podem limitar ou potencializar essa prosperidade. Laguna, Mangui e Ullua (2022) ampliaram a discussão ao demonstrar o potencial regenerativo de biomateriais como micélio e algas, oferecendo um contraponto crítico aos materiais tradicionais que, embora eficientes estruturalmente, não atendem aos

requisitos regenerativos discutidos na literatura contemporânea. Assim, cada achado do estudo de caso dialogou com essas perspectivas complementares, consolidando a articulação entre desempenho mecânico, sustentabilidade e regeneração.

O primeiro resultado relevante do estudo de caso refere-se à compreensão das cargas biomecânicas e pontos críticos de tensão, evidenciada pela modelagem computacional mostrada na Figura 2. A simulação confirmou que regiões como o pescoço da haste, a interface cabeça–liner e o acetábulo concentram tensões elevadas, alinhando-se às observações clínicas descritas por Souza (2010). Esse resultado reforçou a necessidade de considerar parâmetros estruturais desde o início do processo de design, conforme defendem Brown (2021) e Manzini e Vezzoli (2008), para reduzir revisões cirúrgicas, prolongar a vida útil do implante e minimizar impactos à saúde dos usuários e aos sistemas de saúde.

O Quadro 4 sintetizou o pipeline metodológico adotado e demonstrou que o MEF é uma ferramenta de cálculo e integra diretamente dimensões de sustentabilidade. A redução de prototipagem física, de testes destrutivos e de consumo energético durante o desenvolvimento dialogou com o princípio de eficiência ecológica e circularidade, destacado por McDonough e Braungart (2002) no paradigma *Cradle to Cradle*. Ao estruturar o processo desde a definição da geometria até a validação, o pipeline mostrou como a simulação computacional pode funcionar como prática sustentável, evitando desperdícios e racionalizando recursos.

O Quadro 5 apresentou os resultados qualitativos obtidos para cada material e demonstrou que o desempenho mecânico varia substancialmente entre as alternativas. Ligas como aço 316L apresentaram hotspots de tensão, o que corrobora as limitações históricas apontadas por Oréfice, Pereira e Mansur (2006). A liga Ti-6Al-4V, por sua vez, exibiu desempenho superior e menor risco de falhas por fadiga, confirmando sua adequação para aplicações críticas. As cerâmicas apresentaram baixíssimo desgaste, mas maior fragilidade ao impacto, ainda que seus bons resultados tribológicos estejam em consonância com autores como Souza (2010). A análise desses dados revelou que a seleção de materiais deve incluir resistência mecânica, incorporando ciclo de vida, impacto ambiental e regeneratividade, conforme defenderam Cheshire (2024) e Sachs (2021).

O resultado mais inovador surgiu com a aplicação da Ferramenta para Análise Regenerativa dos Materiais, apresentada no Quadro 6. A matriz demonstrou que materiais amplamente utilizados na ortopedia, como o Co-Cr-Mo e o UHMWPE, possuem baixo potencial regenerativo, apresentando fragilidades em dimensões como circularidade e impacto social. Esse achado confirmou o argumento de Fry (2023) sobre o risco de práticas ‘pseudo-sustentáveis’ e ratifica a necessidade de uma transição para materiais que verdadeiramente regeneram ecossistemas e comunidades. Neste contexto, biomateriais derivados de micélio e algas apareceram como alternativas com pontuações máximas na matriz, alinhando-se diretamente às contribuições teóricas de Laguna, Mangui e Ullua (2022), que destacam o potencial regenerativo desses materiais para regenerar solos, capturar carbono e reintroduzir ciclos biológicos.

Ao comparar os resultados do MEF (Quadro 5) com a análise regenerativa (Quadro 6), torna-se evidente que o desempenho estrutural e a sustentabilidade não necessariamente convergem. Embora a liga Ti-6Al-4V apresente excelente desempenho mecânico, os biomateriais regenerativos superaram todas as alternativas em impacto positivo, circularidade e contribuição socioambiental, confirmando o argumento de Drew, Winhall e Robinson (2022) de que o design regenerativo deve gerar prosperidade ecossistêmicas e reduzir danos.

Assim, os resultados do estudo de caso demonstraram que a prática do Design Sustentável Regenerativo depende da integração entre análises técnicas (MEF) e ferramentas avaliativas holísticas (Quadro 6). A abordagem inclui cálculo estrutural e deve agregar também dimensões sociais, culturais e ecológicas, conforme discutido por Sachs (2021) e Manzini e Vezzoli (2008). Essa síntese metódica reforça o papel do designer como mediador entre tecnologia, sustentabilidade e regeneração, alinhando-se ao itinerário regenerativo apresentado no referencial teórico.

8 - Considerações Finais

As discussões desenvolvidas neste ensaio evidenciaram que o Design Sustentável, ao longo de sua trajetória histórica, se consolidou como uma abordagem estratégica para enfrentar os desafios socioambientais contemporâneos. Desde as críticas pioneiras de Papanek (1985) ao consumismo e ao Design focado apenas ao mercado, até a emergência das práticas regenerativas discutidas por Drew, Winhall e Robinson (2022), se observa um deslocamento decisivo: o Design deixa de estar reduzido ao estético e funcional para se tornar uma força ética, cultural e socioambiental, capaz de transformar sistemas produtivos e formas de vida.

Os avanços em bioinovação, biomimética e biomateriais reforçam esse movimento. Conforme apontaram Laguna, Mangui e Ullua (2022), o uso de materiais vivos, como micélio, algas e compósitos bioativos, reduz impactos e possui a capacidade de regenerar ecossistemas, aproximando o Design da Ecologia básica. A integração entre Design e Soluções baseadas na Natureza reconfigura o horizonte da prática profissional, permitindo imaginar produtos que coexistem harmonicamente com o ambiente e contribuem para restaurar processos ecológicos degradados.

Outro eixo aqui abordado foi a incorporação de estratégias de circularidade e digitalização. Tecnologias como blockchain, inteligência artificial, realidade aumentada e gêmeos digitais, discutidas por Costa et al. (2021) e Javaid et al. (2022), transformam radicalmente a maneira como se projeta, rastreia e reutiliza produtos, elevando a transparência e a eficiência das cadeias produtivas. O cruzamento dessas tecnologias com o Design possibilita redução de desperdícios, otimização de recursos e a construção de ecossistemas industriais mais responsáveis e resilientes.

No estudo de caso apresentado, a integração entre o Método dos Elementos Finitos (MEF) e a Ferramenta de Análise Regenerativa dos Materiais (Quadro 6) demonstrou que seleções de materiais devem ser avaliadas pela performance mecânica e pelos seus impactos ambientais, sociais e regenerativos. Enquanto o MEF (Quadros 4 e 5) identificou materiais como a liga Ti-6Al-4V como altamente eficientes estruturalmente, a análise regenerativa revelou que biomateriais possuem o maior potencial de contribuir para ciclos ecológicos positivos. Esses resultados confirmaram as perspectivas de Cheshire (2024), para quem a prosperidade de sistemas vivos deve ser critério central no design regenerativo.

A formação em Design emerge, portanto, como dimensão essencial para sustentar essa transição. A formação de novos designers deve incorporar desde cedo metodologias ativas, tecnologias imersivas e estudos baseados em problemas reais, preparando profissionais capazes de articular técnica, ética e regeneração, em consonância com o que defendem Manzini e Vezzoli (2008) e Sachs (2021). A colaboração entre universidades, centros de pesquisa e indústrias amplia esse potencial, criando ambientes de inovação orientados à sustentabilidade profunda.

Diante das perspectivas analisadas, futuras pesquisas podem investigar os impactos sociais e econômicos das práticas regenerativas, avaliar a adoção de tecnologias emergentes em sistemas circulares e desenvolver estratégias para mitigar práticas de greenwashing, conforme advertido por Fry (2023). Há grande potencial para a criação de novas metodologias educacionais que promovam designers mais críticos, conscientes e inovadores.

Este ensaio reafirma que o Design Sustentável, especialmente em sua vertente regenerativa, constitui uma abordagem interdisciplinar e sistêmica capaz de orientar práticas projetuais alinhadas à saúde dos ecossistemas e das comunidades humanas. Ao unir análise técnica, conceito ecológico e tecnologias emergentes, o Design se torna um instrumento indispensável para a construção de futuros mais sustentáveis, resilientes e equitativos.

Referências

- AITA, L. H. **Experiências de inovação social em living labs: contribuições do design estratégico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- BENYUS, J. M. **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. New York: Harper Perennial, 2002.
- BORATTO, M. A. L. **Design de superfícies têxteis sustentáveis: processos e estratégias com biomateriais à base de celulose bacteriana**. 2024. Tese (Doutorado em Design) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Bauru, 2024.
- BROWN, T. **Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation**. New York: Harper Business, 2009.
- CHESHIRE, D. **Regenerative by Design: Creating living buildings and cities**. Routledge, 2024.
- COSTA, M. M.; NETO, J. F. B.; ALBERTE, E. P. V.; CARNEIRO, A. P.; VENTIN, J. T. I. **Blockchain para fomento da economia circular na construção: um panorama sobre a produção científica**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 3., 2021, Brasília. *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção*. Brasília: [editor ou instituição organizadora], 2021. p. 1-13.
- DREW, C; WINHALL, J; ROBINSON, C. **System-shifting design: An emerging practice explored**. 2022.
- CHO, Y; PARK, K. S. **Designing immersive virtual reality simulation for environmental science education**. *Electronics*, v. 12, n. 2, p. 315, 2023.
- FRY, T. **Design Futuring: Sustainability, Ethics and New Practice**. Oxford: Berg Publishers, 2009.
- JAVOID, M.; HALEEM, A.; SINGH, R. P.; SUMAN, R. **Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study**. *Journal of Industrial Integration and Management*, v. 7, n. 1, p. 83-111, 2022.
- KHANNA, A. S. **Transcending from Sustainable Communities and Smart Cities to Regenerative Responsive Social Ecological Technological Communities and Cities**. 2021. Tese (Doutorado em Cotutela Internacional em Geografia, especialidade Planejamento Regional e Urbano pela Universidade de Lisboa, e em Ciências do Ambiente, especialidade Ecologia Aplicada e Paisagística pela Universidade de Ciências Checa Vida Praga) – University of Minnesota, Minnesota, 2021.
- KOPP, V. V. **Sustentabilidade de materiais renováveis: couro e material de micélio**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

LAGUNA, M. V; MANGUI, S. P. M; ULLUA, S. Ni. **Los biomateriales y la neoartesanía: estímulos creativos para el diseño industrial**. *Cuaderno 159. Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, 2023, p. 191-201.

LAZZERINI, C, A. **Modelos de negócios circulares: um estudo de micro e pequenas empresas no varejo de moda brasileiro**. 2019. Tese (Doutorado em Administração) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

LOPES, I. B. **Análise Da Transformação Digital Na Indústria Da Construção Civil. Projeto de Conclusão de Curso II**. Universidade Federal Fluminense Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Civil, Niterói, Brasil, 2022.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **Design for Environmental Sustainability**. London: Springer, 2008.

MALSHE, A. P.; BAPAT, S.; RAJURKAR, K. P.; LIU, A.; LINARES, J. M. **Exploring the intersection of biology and design for product innovations**. *CIRP Annals*, v. 72, n. 2, p. 569-592, 2023.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things**. New York: North Point Press, 2002.

MEJÍA, G. M.; HENRIKSEN, D.; XIE, Y.; GARCÍA-TOPETE, A.; MALINA, R. F.; JUNG, K. **From researching to making futures: a design mindset for transdisciplinary collaboration**. *Interdisciplinary Science Reviews*, v. 48, n. 1, p. 77-108, 2023.

MORAES, R; NECYK, B. J; MARTINS, B. **Teorias pedagógicas e seu impacto no ensino superior de Design**. *PPG Design Caderno Científico*, 2024.

MORAES, V. M. **Ressignificando a educação do design: diversificação curricular para uma pedagogia pluriversal**. 2023. Dissertação (Mestrado em Design para a Sustentabilidade) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Belas Artes, Lisboa, 2023.

ORÉFICE, R. L.; PEREIRA, M. M.; MANSUR, H. S. **Biomateriais Fundamentos e aplicações Rio de Janeiro: Cultura Médica**, 2006.

PAPANEK, V. **Design for the Real World: Human Ecology and Social Change**. Chicago: Academy Chicago Publishers, 1985.

SACHS, J. **The Age of Sustainable Development**. New York: Columbia University Press, 2015.

SILVA, E. A.; CAMARGO, A. A.; SILVA, M. B.; MOURA, R. A. **Neuroergonomia y tecnologías inmersivas para lograr un envejecimiento saludable sin dolor y además sin ortesis**. *Revista Ciências Exatas*, v. 30, n. 2, 2024.

SOUZA, Adriano José Sorbille de., **Análise Computacional de Tensão Aplicado em Prótese de Quadril**. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, p. 32, 2010.

ZEEGERS, M.; TAYLOR, N. **Sustainability in Education: Teaching for the Future**. Cham: Springer, 2020.

ESTUDO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS
DO PROCESSO DE MOAGEM DE ALTA
ENERGIA NA MICROESTRUTURA DA
LIGA TI-13NB-13ZR.

Bárbara Lois Mathias de Souza Carneiro
Pérsio Mozart Pinto
Durval Rodrigues Jr.

RESUMO

Este estudo insere-se no contexto do desenvolvimento de biomateriais metálicos para aplicações em implantes ortopédicos. O objetivo foi avaliar a influência do tempo de moagem e da razão esferas: pó (BPR) nas características microestruturais da liga Ti-13Nb-13Zr. Misturas de pós elementares de titânio, nióbio e zircônio foram processadas em moinho SPEX utilizando jarros e esferas de carbeto de tungstênio (WC), sob diferentes condições de moagem definidas por um planejamento fatorial 2². Os pós obtidos foram caracterizados por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura com análise química por (MEV/EDS) e análise granulométrica. Os resultados demonstraram que o aumento da razão esferas: pó e do tempo de moagem promove alterações significativas na morfologia e no tamanho das partículas, favorecendo a homogeneização da mistura e a incorporação dos elementos de liga. As análises químicas evidenciaram a presença de carbeto tungstênio (WC) proveniente do desgaste do meio de moagem, indicando a influência do processamento na composição final dos pós. Os resultados obtidos demonstram o potencial da moagem de alta energia como ferramenta para o controle microestrutural da liga Ti-13Nb-13Zr destinada à produção de biomateriais porosos para aplicações ortopédicas.

Palavras-chave: Liga Ti-13Nb-13Zr. Microestrutura. Moagem de alta energia.

1. INTRODUÇÃO

Os biomateriais implantáveis desempenham papel fundamental no reparo e substituição de tecidos ósseos, especialmente em situações clínicas complexas, como artroplastias e materiais de fixação. Entretanto, limitações relacionadas à disponibilidade de material e aos riscos associados ao procedimento têm impulsionado o desenvolvimento de alternativas (PINTO, 2022).

Nesse contexto, ligas metálicas à base de titânio (Ti) destacam-se devido à elevada biocompatibilidade, resistência à corrosão e propriedades mecânicas adequadas para aplicações ortopédicas. Apesar do amplo uso clínico, ligas convencionais de Ti ainda apresentam limitações importantes, como módulo de elasticidade superior ao do tecido ósseo, o que pode levar ao efeito de *stress shielding*, além da presença de elementos potencialmente tóxicos, como alumínio e vanádio. Como consequência, observa-se a necessidade de desenvolvimento de ligas com composição química mais adequada e comportamento mecânico mais compatível com o osso humano. Nesse sentido, ligas β -metaestáveis têm sido amplamente investigadas por apresentarem menor módulo de elasticidade e melhor desempenho biomecânico (KLINGE et al., 2023).

Dentre essas ligas, a Ti-13Nb-13Zr destaca-se por combinar propriedades mecânicas favoráveis, elevada resistência à corrosão e excelente biocompatibilidade, sendo considerada uma das mais promissoras para aplicações biomédicas. A adição de nióbio (Nb) e zircônio (Zr) promove a estabilização da fase β e contribui para a formação de camadas passivas mais estáveis e resistentes à degradação em meios fisiológicos, reduzindo a liberação de íons metálicos e melhorando a interação com o meio biológico (DĄBROWSKI, 2023). Além disso, esses elementos são considerados não citotóxicos, reforçando a segurança do material para uso implantável a longo prazo.

A simples mistura desses pós pode resultar em heterogeneidades químicas e microestruturais, comprometendo as propriedades finais do material. Nesse contexto, a moagem de alta energia surge como etapa fundamental do processamento, pois promove intensa deformação plástica, soldagem a frio e fragmentação das partículas, resultando em maior homogeneização química e refinamento microestrutural. Esses fenômenos aumentam a energia armazenada no material, favorecendo a difusão durante a sinterização e contribuindo para a formação de ligas mais homogêneas e densas (SURYANARAYANA, 2001; KLINGE et al., 2023).

Outro aspecto relevante é a influência dos parâmetros de processamento, como tempo de moagem e razão esferas: pó nas características finais dos pós obtidos. Variações nessas condições podem alterar significativamente a morfologia das partículas, o tamanho de grão, a distribuição de fases (RAIMUNDO et al., 2020; CÂMARA et al., 2021).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência das variáveis do processo de moagem de alta energia na microestrutura dos pós da liga Ti13Nb13Zr. Espera-se, com isso, contribuir para o desenvolvimento de biomateriais com propriedades otimizadas para aplicações ortopédicas, possibilitando o ajuste das condições de processamento de acordo com os requisitos clínicos e funcionais desejados.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados pós comerciais de titânio (Ti), nióbio (Nb) e zircônio (Zr). O pó de titânio, fornecido pela Alfa Aesar, apresenta pureza de 99,95% e tamanho de partícula inferior a 45 μm . O pó de nióbio foi produzido pela técnica de hidrogenação-desidrogenação (HDH) no DEMAR-EEL-USP, com pureza de 99,99% e tamanho de partícula inferior a 45 μm . O pó de zircônio, fornecido pela Sigma-Aldrich, possui pureza de 99% e tamanho de partícula inferior a 150 μm . Durante a etapa de moagem de alta energia, utilizou-se álcool isopropílico de pureza analítica como agente controlador de processo.

1.1 Variáveis do processo de moagem de alta energia

As variáveis do processo de moagem de alta energia foram ajustadas para otimizar as propriedades da liga Ti-13Nb-13Zr. Foram analisadas duas variáveis principais: tempo de moagem e razão entre a massa das esferas e a massa do pó (BPR). O tempo de moagem influencia diretamente a granulometria, homogeneidade da mistura e ocorrência de reações físico-químicas. A razão BPR afeta a transferência de energia cinética e a eficiência de moagem e a possível contaminação do material. O uso de agente controlador de processo (ACP), neste caso o álcool isopropílico, contribui para controlar a micro soldagem entre partículas, reduzir aglomeração e melhorar a eficiência da moagem.

1.2 Planejamento estatístico de experimento

Foi utilizado um planejamento fatorial completo 2^2 para avaliar o efeito das variáveis BPR e tempo de moagem. As razões BPR adotadas foram 3:1 e 10:1. Os tempos de moagem variaram entre 2 h e 10 h, mantendo-se constante a velocidade do moinho SPEX 8000M e o uso de álcool isopropílico como ACP. O planejamento experimental permitiu avaliar os efeitos dessas variáveis na composição química, granulometria e propriedades da liga Ti-13Nb-13Zr, como microestrutura.

1.3 Pesagem do pó na *glove-box* e das esferas de moagem

Os pós elementares foram pesados em balança analítica com precisão de $\pm 0,1$ mg, dentro de uma *glove-box* sob atmosfera de argônio, garantindo a obtenção da composição Ti-13Nb-13Zr. As condições experimentais seguiram o planejamento definido. As esferas foram pesadas conforme as razões BPR de 3:1 e 10:1. Essa proporção influencia diretamente a energia de impacto durante a moagem, sendo afetada pela massa e dureza das esferas.

1.4 Montagem dos jarros na *glove-bag* e moagem

A mistura de pós foi transferida para a *glove-bag* sob atmosfera de argônio, e adicionados 12 ml de álcool isopropílico e as esferas de moagem. Em seguida, os jarros foram vedados e acoplados ao moinho SPEX 8000M para moagem durante 2 h e 10 h. Após a moagem, os pós foram transferidos para erlenmeyer e submetidos à secagem entre 60 °C e 70 °C até obtenção do pó final.

2. RESULTADOS

2.1 Caracterização da superfície

A Figura 1 apresenta a morfologia dos pós da liga Ti-13Nb-13Zr após o processo de moagem de alta energia, obtida por elétrons secundários em análise no Microscópio eletrônico de varredura (MEV) com aumento de 1000x. Na Figura 2 é possível observar os histogramas referentes aos tamanhos de partículas dos pós da liga Ti-13Nb-13Zr. Na Figura 3 temos o Difractograma de raios-x (DRX) e na Tabelas 1 são apresentados os resultados das análises químicas por Espectroscopia dispersiva de raios x (EDS).

2.2 Figuras

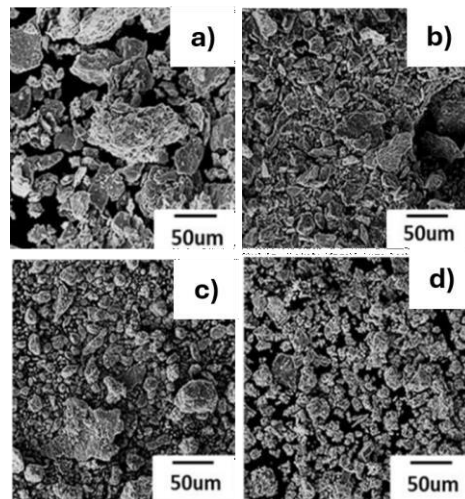


Figura 1: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos pós da liga Ti-13Nb-13Zr obtidos por moagem de alta energia. (a) WC – 3:1 – 2h (b) WC – 10:1 – 2h (c) WC – 3:1 – 10h (d) WC – 10:1 – 10h

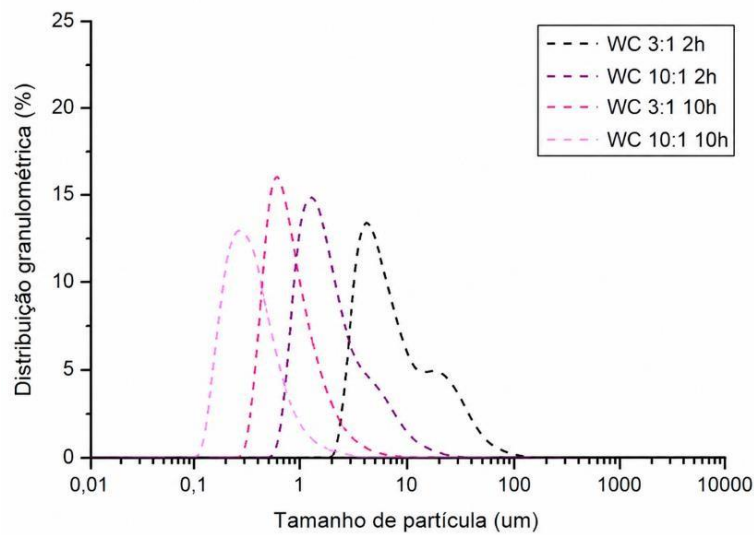


Figura 2: Histogramas referentes aos tamanhos de partículas dos pós da liga Ti-1Nb-13Zr.

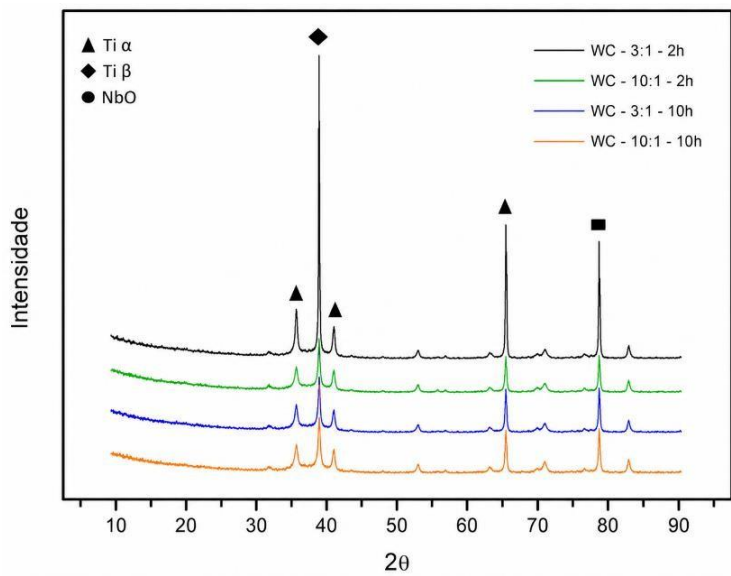


Figura 3: Difratograma das amostras de pó da liga Ti-13Nb-13Zr

2.3 Tabelas

Amostra	Ti (%)	Zr (%)	Nb (%)	W (%)
a	73,90	12,6	9,90	3,6
		0		0
b	72,10	10,5	12,80	4,6
		0		0
c	73,40	10,7	13,70	2,2
		0		0
d	73,90	10,2	11,60	4,3
		0		0

Tabela 1: Análise química de Espectroscopia dispersiva de raios x (EDS). (a) WC – 3:1 – 2h (b) WC – 10:1 – 2h (c) WC – 3:1 – 10h (d) WC – 10:1 – 10h

3. DISCUSSÃO

A análise das micrografias dos pós processados por moagem de alta energia (Figura 1) evidenciou a influência significativa das variáveis estudadas sobre a morfologia e o tamanho das partículas. De maneira geral, o aumento do tempo de moagem promoveu maior refinamento microestrutural em decorrência da intensificação dos mecanismos de fratura induzidos pelos sucessivos impactos entre as esferas e as partículas de pó. O aumento da razão esferas: pó de 3:1 para 10:1 elevou a energia transferida ao sistema, favorecendo maior deformação plástica e homogeneização dos elementos constituintes da liga. Condições mais severas de moagem resultaram em maior interação entre as partículas e maior incorporação dos elementos de liga, contribuindo para a formação de uma microestrutura mais homogênea (SURYANARAYANA, 2020).

As análises granulométricas (Figura 2) corroboraram as observações obtidas por microscopia eletrônica, demonstrando alterações significativas na distribuição de tamanho de partículas em função das condições de moagem. O refinamento observado está associado ao aumento da frequência e da intensidade dos impactos, que favorecem os mecanismos de fragmentação durante o processamento mecânico. Os resultados das análises químicas por EDS revelaram a presença de tungstênio em todas as condições avaliadas. A incorporação desse elemento está associada ao desgaste do jarro e das esferas de carbeto de tungstênio durante a moagem. Observou-se que a contaminação por tungstênio variou conforme as condições de processamento, evidenciando que a energia de moagem exerce influência direta sobre o desgaste do meio de moagem e, consequentemente, sobre a composição química final dos pós (KUMAR et al., 2023).

A análise por difração de raios X (Figura 3) revelou que os picos mais intensos estão associados à fase β do titânio. A presença de Nb como estabilizador dessa fase promove a transformação da fase α para β , aumentando sua fração volumétrica, conforme relatado na literatura (GEETHA et al., 2020; NIINOMI et al., 2021). Observou-se ainda que o Zr não influenciou significativamente na formação das fases, comportamento esperado devido à sua alta solubilidade no titânio. A evolução dos picos de difração sugere que a moagem de alta energia contribui para aumentar a homogeneidade química do sistema e acelerar os mecanismos de formação da liga.

De forma geral, os resultados demonstram que o controle do tempo de moagem e da razão esferas: pó constitui uma ferramenta importante para ajustar as características microestruturais dos pós da liga Ti-13Nb-13Zr.

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que os parâmetros de moagem influenciam diretamente o tamanho de partículas, a incorporação de elementos e a evolução microestrutural da liga Ti-13Nb-13Zr. O aumento da razão esferas: pó promoveu maior transferência de energia ao sistema, favorecendo a homogeneização da mistura e a incorporação dos elementos de liga.

Da mesma forma, o aumento do tempo de moagem intensificou os mecanismos de deformação plástica e fragmentação das partículas, contribuindo para o refinamento microestrutural dos pós processados. As análises químicas evidenciaram a incorporação de tungstênio proveniente do desgaste do meio de moagem de carbeto de tungstênio, demonstrando que as condições de processamento influenciam diretamente a composição química final do material.

De maneira geral, o controle do tempo de moagem e da razão esferas: pó mostrou-se fundamental para o ajuste das características dos pós, evidenciando o potencial da liga Ti-13Nb-13Zr para aplicações biomédicas. Estudos complementares envolvendo propriedades mecânicas, resistência à corrosão e avaliação biológica são recomendados para validar o potencial desses materiais em aplicações clínicas futuras.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil, pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa de estudos, fundamentais para a realização deste trabalho. O pesquisador DRJ é bolsista produtividade CNPq.

BIBLIOGRAFIA

CÂMARA, D. et al. Influência dos parâmetros de moagem em ligas metálicas. *Materials Research*, São Carlos, v. 24, n. 4, p. e20210045, 2021.

DĄBROWSKI, B. Titanium alloys for biomedical applications. *Materials Science and Engineering A*, Amsterdam, v. 856, p. 144–152, 2023.

GEETHA, M. et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Journal of Materials Science*, v. 55, p. 144–159, 2020.

KLINGE, S. et al. Beta titanium alloys for orthopedic implants. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Bio-materials*, Hoboken, v. 111, n. 5, p. 1200–1212, 2023.

KUMAR, A. et al. Contamination effects during mechanical milling. *Powder Technology*, v. 412, p. 117984, 2023. NIINOMI, M. et al. Advances in metallic biomaterials. *Acta Biomaterialia*, v. 123, p. 1–21, 2021.

PINTO, R. M. *Biomateriais aplicados à ortopedia*. 2022. Trabalho acadêmico (Graduação/Mestrado) — Universidade de São Paulo

RAIMUNDO, G. et al. High-energy milling effects on powder metallurgy. *Powder Technology*, Amsterdam, v. 376, p. 420–430, 2020.

SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, v. 46, p. 1–184, 2020. SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, Oxford, v. 46, n. 1–2, p. 1–184, 2001.