

Artigo temático

Semear futuros

Dunas digitais: parametrizando *bioscaffolds* costeiros através da lógica de crescimento do Jundu

 Adriana Lima

adrianarri@usp.br

Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da
Universidade de São Paulo,
São Paulo (SP), Brasil.

 Arthur Lara

arthurlara@usp.br

Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da
Universidade de São Paulo,
São Paulo (SP), Brasil.

Resumo: Diante da emergência climática e da aceleração da erosão costeira, as soluções tradicionais de engenharia rígida têm se mostrado insuficientes e ecologicamente desconectadas. Este artigo propõe uma abordagem de design regenerativo que une a morfogênese digital à sabedoria ecológica das espécies nativas, alinhando-se à temática de "semear futuros". O trabalho apresenta o desenvolvimento de *bio-scaffolds* costeiros — dunas artificiais projetadas não apenas como barreiras físicas, mas como infraestruturas biorreceptivas destinadas à colonização pelo Jundu (vegetação psamófila). A metodologia emprega algoritmos de *L-Systems* (Sistemas-L) para simular a lógica de crescimento e enraizamento dessa vegetação, traduzindo parâmetros biológicos de propagação e fixação de areia em geometria computacional. O resultado são protótipos de estruturas porosas, fabricadas digitalmente, cuja morfologia foi otimizada para capturar sedimentos e oferecer nichos de proteção para o estabelecimento da flora nativa. Ao hibridizar o design paramétrico com processos naturais, o estudo demonstra como o design pode atuar como agente de cura da paisagem, transformando a infraestrutura técnica em uma experiência regenerativa do cotidiano costeiro.

Palavras-chave: Design regenerativo; L-Systems; dunas artificiais; bioreceptividade; Jundu.

Digital dunes: parameterizing coastal bioscaffolds through Jundu growth logic

Abstract: Facing the climate emergency and accelerating coastal erosion, traditional rigid engineering solutions have proven insufficient and ecologically disconnected. This article proposes a regenerative design approach that unites digital morphogenesis with the ecological wisdom of native species, aligning with the theme "sowing futures." The work presents the development of coastal "bio-scaffolds"—artificial dunes designed not only as physical barriers but as bioreceptive infrastructures intended for colonization by Jundu (psammophilous vegetation). The methodology employs L-System algorithms to simulate the growth and rooting logic of this vegetation, translating biological parameters of propagation and sand fixation into computational geometry. The result is digitally fabricated porous prototypes, whose morphology has been optimized to capture sediment and offer protective niches for the establishment of native flora. By hybridizing parametric design with natural processes, the study demonstrates how design can act as an agent of landscape healing, transforming technical infrastructure into a regenerative experience of coastal daily life.

Keywords: Regenerative design; L-Systems; artificial dunes; bioreceptivity; Jundu.

1. Introdução

A zona costeira é, por definição, um território de conflito e transformação constante. No entanto, no atual cenário de emergência climática, o equilíbrio dinâmico entre o mar e a terra tem sido rompido de forma acelerada. O aumento do nível dos oceanos e a intensificação de eventos extremos expõem a fragilidade das nossas fronteiras urbanas¹, historicamente defendidas por uma engenharia "cinza" e rígida: muros de arrimo, enrocamentos e espigões. Tais estruturas, embora eficazes a curto prazo para a contenção estática, frequentemente resultam na "morte" da praia, bloqueando a troca sedimentar, acelerando a erosão basal e eliminando os ecossistemas de transição.

Este artigo insere-se na temática "Semear Futuros" ao questionar a passividade da infraestrutura costeira. Propõe-se aqui a substituição do paradigma da barreira pelo paradigma da membrana regenerativa. Se o design tem o poder de "semear outras narrativas", como sugere a chamada deste dossiê, ele deve ser capaz de projetar estruturas que colaborem com os processos biológicos, e não que os anulem. O foco deste estudo é a vegetação de **Jundu**², verdadeira engenheira natural das dunas, responsável pela fixação de areia e proteção da costa. Investigamos como o Design Computacional, através de uma abordagem de **design biorreceptivo**³, pode decodificar a inteligência morfológica dessa vegetação para criar **bioscaffolds**⁴ — dunas artificiais de bioconcreto que atuam como próteses ecológicas, acelerando a regeneração da paisagem e o restabelecimento da defesa natural.

2. Fundamentação Teórica: Da Mimese à Agência Biológica

A concepção de infraestruturas regenerativas exige, antes de tudo, um aprofundamento vertical na biomimética. Conforme estabelecido por Janine Benyus (1997), a biomimética pode operar emulando a forma, o processo ou o ecossistema. O presente projeto fundamenta-se

¹ Casos severos de erosão costeira têm sido registrados em municípios como Itaúna (ES), evidenciando a urgência de novas abordagens infraestruturais diante das intempéries climáticas.

² Jundu (Vegetação Psamófila): vegetação nativa rasteira típica de praias brasileiras. Suas raízes funcionam como uma rede que estabiliza a areia e forma as dunas, sendo a principal defesa natural da costa.

³ Biorreceptividade: capacidade intencional de um material (neste caso, o bioconcreto) de convidar e sustentar a vida.

⁴ *Bioscaffold*: traduzido literalmente como "andaime biológico". Refere-se a matrizes tridimensionais que servem de suporte temporário para ecossistemas vivos até que a natureza consiga se sustentar sozinha na paisagem.

principalmente na biomimética de processo: busca-se decodificar as regras dinâmicas de crescimento e adaptação que conferem à flora costeira sua resiliência.

Contudo, como apontam Marcos Cruz⁵ e Richard Beckett (2016), a visão clássica da biomimética centrada na "natureza como mentora" corre o risco de tornar-se excessivamente prescritiva. Historicamente, a apropriação dessa teoria pelo design tendeu a focar na performatividade ambiental, reduzindo a natureza a um catálogo de soluções utilitárias. Para superar esse limite funcionalista, faz-se necessário substituir a metáfora moderna da "pele" arquitetônica — concebida como uma fronteira asséptica e defensiva — pelo conceito de "casca arquitetônica" (architectural bark)⁶. Como alerta Cruz (2016), a casca não deve ser compreendida apenas como uma extrapolação biomimética da natureza para a arquitetura; ela deriva de um fenômeno natural específico, mas vai muito além da mimese formal (a simples representação estética da rugosidade) ou funcional (a proteção do invólucro). A casca é intencionalmente desenhada para ser bio-colonizada, integrando a natureza na própria espessura do tecido construído.

A superação desse limite ocorre através de uma biomimética processual que se inicia no projeto conceitual e se materializa por meio de uma rigorosa interdisciplinaridade entre biologia, bioquímica e arquitetura. É a partir dessa premissa que as investigações do BiotA Lab (Bartlett School of Architecture) avançam, ancoradas em passos significativos como os da bióloga espanhola Sandra Manso Blanco, que desenvolveu e testou um novo tipo de concreto biorreceptivo capaz de fornecer substrato para a proliferação de sistemas fotossintéticos sem afetar o concreto estrutural. A colaboração direta com a bioquímica permite o desenvolvimento de compósitos de pH neutralizado, transformando especulações teóricas em suportes físicos reais.

Essa transição da representação para o metabolismo hospedeiro requer uma reavaliação ontológica do objeto técnico. Ao operar nessa zona limiar, o *bioscaffold* atua como uma entidade híbrida, uma "quimera

⁵ Marcos Cruz e Richard Beckett (2016) estabelecem as bases teóricas do design biorreceptivo aplicado à arquitetura e ao desenvolvimento de bioscaffolds cimentícios no *BiotA Lab*, *Bartlett School of Architecture*.

⁶ Cabe ressaltar a distinção conceitual estabelecida pelos autores: *Architectural Bark* (Casca Arquitetônica) não se refere a um projeto construído específico, mas ao marco teórico formulado por Cruz e Beckett (2016). A validação experimental desse conceito ocorreu no *BiotA Lab* (UCL) por meio da prototipagem e fabricação digital de painéis e tijolos de concreto biorreceptivo.

molmídia"⁷ (ASCOTT, 2003) que possui a dureza da infraestrutura e a agência biológica da planta. Ao projetar a casca arquitetônica, o arquiteto deixa de desenhar apenas superfícies para projetar protocolos de convivialidade multiespécie. Conforme a perspectiva cosmopolítica de Isabelle Stengers (2015), o projeto da paisagem contemporânea assume a responsabilidade de mediar coexistências, transformando o objeto técnico em um recife urbano que acolhe a agência microbiana e botânica.

Neste sentido, afastamo-nos da visão tradicional da arquitetura como produção de formas estáticas para abraçar o conceito de "arquiteturas do tempo", como discutido por Sanford Kwinter (2002). O design não desenha o objeto final, mas projeta as regras de devir do objeto. Ao utilizar algoritmos generativos, deslocamos o foco da forma para a morfogênese — a origem e evolução da forma. O design torna-se, portanto, o projeto de um metabolismo.

Essa abordagem alinha-se aos princípios do Lo-TEK⁸ (Watson, 2020), que advoga pelo "Indigenismo Radical". No entanto, propomos aqui uma atualização tecnológica desse conceito: a sabedoria ancestral sobre o manejo das dunas e a proteção da costa não deve ser vista como oposta à computação avançada. Pelo contrário, a modelagem algorítmica nos permite, pela primeira vez, simular e otimizar a complexidade dessas tecnologias vernaculares, garantindo que a intervenção humana (o bioconcreto⁹) não atue como um corpo estranho, mas como um substrato catalisador para os processos ecológicos preexistentes.

A partir dessa fundamentação teórica sobre a biomimética processual aplicada ao design biorreceptivo, a aproximação conceitual pelo conceito de casca (*bark*) estabelece uma nova matriz metodológica para a pesquisa. No entanto, ela não oferece uma solução formal única; ao contrário, exige que cada projeto busque a sua própria lógica de referência biológica e processual, ditada pelas pressões específicas do ecossistema de inserção. Enquanto as investigações urbanas supracitadas encontram nos musgos e líquens os seus modelos de proliferação sobre o concreto, o

⁷ Quimera Molmídia (Moistmedia): Conceito formulado por Roy Ascott para descrever a convergência entre os sistemas computacionais "secos" (dryware) e os processos biológicos "úmidos" (wetware). No âmbito deste artigo, o *bioscaffold* impresso em 3D representa o artifício técnico que, devido à sua biorreceptividade, permite a acoplagem do metabolismo vegetal, resultando em uma arquitetura quimérica que não é totalmente artificial, nem puramente natural.

⁸ Lo-TEK: acrônimo (*Traditional Ecological Knowledge*) que designa o resgate de infraestruturas baseadas na natureza desenvolvidas por culturas tradicionais, opondo-se à visão de que apenas a alta tecnologia soluciona problemas ecológicos.

⁹ Bioconcreto: material compósito formulado com pH neutro e agregados naturais locais (conchas, areia) para atuar como um substrato fértil e de baixo carbono que acelera o crescimento da vegetação.

projeto *Dunas Digitais* — ao intervir na zona costeira — elege a gramática de enraizamento da vegetação pioneira nativa como o seu organismo-referência, conforme será detalhado na Seção 3 (Metodologia: A Gramática do Jundu).

2.1 Cosmopolíticas do Design: Além do Antropocentrismo

A transição para um design regenerativo exige o abandono da perspectiva puramente antropocêntrica em favor de uma abordagem cosmopolítica, como sugere Isabelle Stengers (2015). Se o Antropoceno marca a era em que a força humana se equipara às forças geológicas, o design deve assumir a responsabilidade de mediar essas escalas. Projetar no Antropoceno não é apenas resolver problemas funcionais humanos, mas orquestrar coexistências entre múltiplas espécies.

Neste contexto, o conceito de "cotidiano" se expande. O cotidiano costeiro não pertence apenas ao banhista ou ao pescador, mas também à microfauna bentônica, às raízes das plantas pioneiras e à dinâmica das marés. O *bioscaffold* atua como um agente da inteligência material: agenciando o espaço entre a necessidade humana de proteção contra a erosão e a necessidade não-humana de habitat e fluxo sedimentar.

Este agenciamento materializa o que Tim Ingold (2011) denomina de "malha da vida" (*meshwork*¹⁰), onde o objeto técnico não é uma interrupção no ambiente, mas um nó que amarra diferentes linhas de devir. Ao parametrizarmos o crescimento do Jundu, estamos projetando um sistema híbrido através de um **design multiespécie**¹¹; desenhando protocolos de hospitalidade para seres que sustentam a vitalidade da paisagem.

2.2 Estado da Arte: Da Engenharia Rígida às "Living Shorelines"

A transição para infraestruturas baseadas na natureza não é um fenômeno isolado, mas parte de um movimento global de revisão das interfaces costeiras. Historicamente, a engenharia costeira operou sob a lógica da resistência estática: quebra-mares e paredões projetados para resistir ao impacto máximo da onda centenária. No entanto, a falência catastrófica

¹⁰ *Meshwork*: Termo cunhado por Tim Ingold (traduzido como "malha"). Define o ambiente como um emaranhado de linhas de movimento e crescimento de diferentes seres que se cruzam continuamente no espaço.

¹¹ *Design Multiespécie*: Abordagem que rompe com o antropocentrismo, incluindo intencionalmente as necessidades de outras formas de vida (plantas, microfauna) como usuários e "clientes" ativos do projeto.

dessas estruturas diante de eventos climáticos extremos evidenciou a fragilidade da rigidez.

Em resposta, emergem conceitos como *Living Shorelines* (Costas Vivas) e *Building with Nature*, que advogam pelo uso de elementos naturais (ostras, mariscos, vegetação de pântano) como primeira linha de defesa. Projetos recentes demonstram a viabilidade técnica dessa abordagem. Destacam-se as matrizes do *Reef Design Lab* na Austrália (GOAD, 2018), que utilizam impressão 3D para gerar módulos de dissipação de energia das ondas, as barreiras de terracota da *Archireef* (YU; BAKER, 2020) em Hong Kong, e o projeto *Nereid* (2025) da Zaha Hadid Architects¹², que utiliza robótica e IA para impressão de recifes.

O presente estudo avança sobre esses precedentes ao focar especificamente na dinâmica de dunas eólicas, um ecossistema frequentemente negligenciado em favor de recifes submersos. Diferente das soluções subaquáticas, o *bioscaffold* de duna opera na interface visível da praia, o que lhe confere um papel social e pedagógico mais preponderante no cotidiano urbano. Ele não está escondido sob a água; ele é parte da paisagem caminhável, exigindo uma estética que dialogue não apenas com a hidrodinâmica, mas com a fenomenologia do lugar.

3. Metodologia: A Gramática do Jundu

O desenvolvimento projetual seguiu um fluxo biomimético dividido em quatro etapas: contextualização territorial, análise do modelo biológico, tradução algorítmica e estudos de viabilidade para fabricação digital.

3.1 Contexto Territorial: A Dinâmica de Enseada em Ubatuba

A aplicação teórica deste estudo focaliza o Litoral Norte de São Paulo, especificamente a região de Ubatuba, um território marcado pela Serra do Mar e por uma costa recortada em enseadas de diferentes energias. A escolha deste sítio justifica-se pela crescente pressão de urbanização sobre as zonas de pós-praia e o consequente "espremimento costeiro" (*coastal*

¹² O projeto *Nereid* (2025), desenvolvido pela Zaha Hadid Architects em colaboração com a D-Shape, e as matrizes do *Reef Design Lab* são referências contemporâneas de como impressoras 3D de larga escala e robótica estão sendo usadas para imprimir recifes artificiais visando restaurar habitats danificados e promover o crescimento de fitoplâncton.

*squeeze*¹³), onde a linha de costa não tem espaço para recuar naturalmente diante da elevação do nível do mar. As praias de enseada da região, sujeitas a ressacas periódicas intensificadas por ciclones extratropicais, sofrem com a perda crônica de sedimentos. A vegetação nativa de restinga e jundu, que naturalmente estabilizaria essas dunas embrionárias, encontra-se fragmentada ou suprimida por muros de propriedades privadas e arruamentos.

O *bioscaffold* é projetado para intervir exatamente nesta zona de conflito: a faixa de transição entre a areia seca e a infraestrutura urbana consolidada. O algoritmo foi calibrado considerando os ventos predominantes do quadrante Sul-Sudeste, responsáveis pelo transporte eólico de sedimentos na região, visando maximizar a captura de areia durante os meses de inverno, quando a praia está mais vulnerável.

3.2. O Modelo Biológico: A Arquitetura da *Ipomoea pes-caprae*

Para o desenvolvimento da gramática gerativa, selecionou-se como organismo-referência a espécie *Ipomoea pes-caprae* (Salsa-da-praia), uma planta reptante fundamental na colonização de dunas embrionárias. A escolha desta espécie fundamenta-se em sua eficiência morfológica: diferentemente de espécies arbóreas que investem na verticalidade, a *I. pes-caprae* desenvolve uma complexa rede de estolões (caules rastejantes) que percorrem a superfície da areia, maximizando a cobertura do solo e a retenção de sedimentos eólicos.

A lógica de crescimento desta espécie opera através de um sistema modular de repetição. Seu desenvolvimento ocorre pela extensão linear de internós, pontuada por nós de enraizamento. Em cada nó, a planta "decide" sua trajetória baseada em tropismos locais: lança raízes adventícias verticais para ancoragem (geotropismo positivo) e bifurca novos ramos laterais para explorar o espaço. É essa arquitetura de "rede ancorada" que o modelo busca mimetizar através de algoritmos de L-Systems, permitindo que a geometria final do *bioscaffold* atue em simbiose com a dinâmica natural de propagação da flora nativa.

¹³ *Coastal Squeeze*: expressão (espremimento costeiro) que ocorre quando a elevação do nível do mar empurra a praia contra barreiras artificiais rígidas (avenidas, muros), impedindo o recuo natural e resultando no desaparecimento da praia.

Figura 1 Diagrama morfológico da *Ipomoea pes-caprae*.

Fonte Elaborada pelos autores com auxílio da IA Generativa do Google, 2026

3.3 Tradução Algorítmica: A Sintaxe do Crescimento

A transposição da estratégia biológica para o ambiente digital via L-Systems alinha-se à busca por uma "materialidade bio-digital", na qual a complexidade formal desempenha um papel funcional direto. Neste contexto, a colonização do espaço deve ser entendida como o processo pelo qual a planta (ou o algoritmo) ocupa o ambiente tridimensional através de lógicas de ramificação e repetição modular.

Ao mimetizar esses processos, o design deixa de ser uma imposição volumétrica estática para se tornar uma simbiose entre regras matemáticas e comportamentos biológicos. Essa lógica permite gerar uma malha multidimensional cuja porosidade não é aleatória, mas sim o resultado de uma busca por estabilidade e ancoragem, oferecendo nichos específicos para o estabelecimento da flora nativa e a captura de sedimentos costeiros.

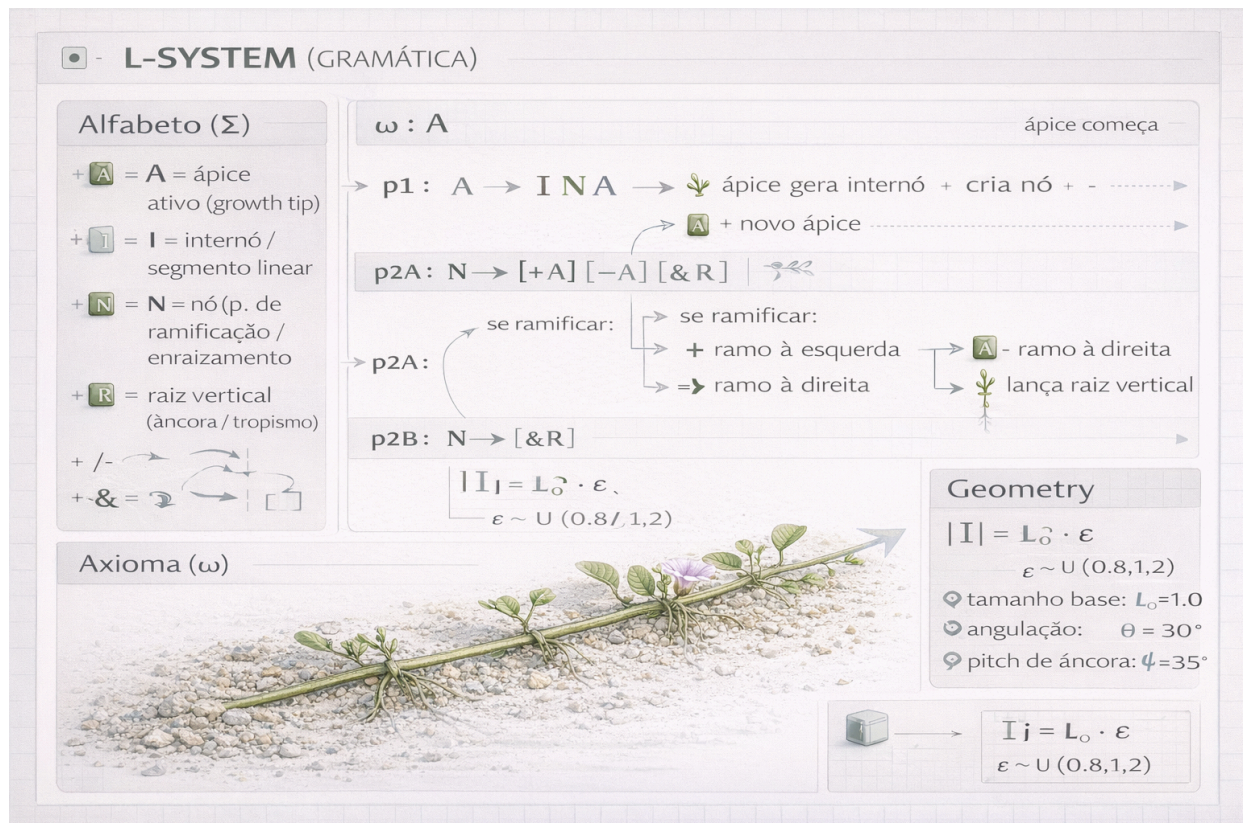
O modelo desenvolvido para a "Gramática Jundu" simula, portanto, a ontogênese do objeto — seu processo de formação no tempo —, permitindo que a estrutura atue como um suporte para o crescimento orgânico

autônomo. Esse formalismo matemático atua como a ponte metodológica ideal entre a lógica de crescimento biológico e a fabricação aditiva (impressão 3D) de estruturas otimizadas, caracterizando uma abordagem de design biomimético processual. Para compor a gramática, estabeleceu-se um dicionário de equivalência entre os órgãos vegetais e os símbolos computacionais, interpretados por uma "*Turtle*" (cursor gráfico):

- A (Ápice): Gema de crescimento ativa.
- I (Internó): Avanço linear do estolão no plano horizontal (XY).
- N (Nó): Operador de ramificação e decisão.
- R (Raiz): Tropismo vertical negativo (Z-), simulando a ancoragem.

As regras de produção para simular a gramática do Jundu foram estruturadas para privilegiar o espalhamento horizontal. Traduzindo a lógica do algoritmo para a linguagem natural, a regra principal determina que cada ponto de crescimento ativo (o ápice) avance criando um novo segmento linear, seguido imediatamente por um nó de ramificação. Ao atingir esse nó estrutural, o sistema avalia probabilidades estocásticas — como um "lançar de dados" virtual — para decidir o seu próximo movimento: ele pode bifurcar em novos ramos laterais para cobrir uma área maior, ou pode lançar uma raiz vertical para garantir a sua ancoragem simulada. É essa sequência contínua de avanços e decisões que cria, progressivamente, a malha tridimensional autoportante necessária para o *bioscaffold*.

Figura 2 Visualização do código/regras do L-System.



Fonte Elaborada pelos autores com auxílio da IA Generativa do Google, 2026

3.3.1 O Motor Computacional: Feedback Loops e Recursividade

A escolha técnica pelo uso de *L-Systems* em detrimento de modelagens CAD tradicionais (como NURBS manuais) justifica-se pela necessidade de incorporar a recursividade biológica no processo de design. O código desenvolvido em Python (integrado ao Grasshopper 3D) não descreve a forma final, mas sim o comportamento de crescimento. Isso é realizado através de ciclos de retroalimentação (*feedback loops*¹⁴). A cada iteração, o sistema avalia o estado espacial dos segmentos gerados. Se um "ramo" digital colide com outro ou penetra o plano do solo virtual além da cota permitida, a regra de produção é alterada localmente, interrompendo aquele vetor ou forçando uma mudança de direção. Isso simula o fenômeno de "timidez das copas" ou a competição por espaço observada nas raízes da *Ipomoea*. Essa inteligência computacional garante que o *bioscaffold* resultante não seja uma massa homogênea, mas uma estrutura otimizada

¹⁴ **Feedback Loops:** ciclos de retroalimentação computacional. Processo em que um algoritmo analisa o resultado da sua última ação para adaptar a seguinte, permitindo que a geometria gerada se adeque aos limites do espaço virtual.

onde o material só é depositado onde é estruturalmente ou biologicamente necessário. O algoritmo, portanto, atua como um "cultivo digital", podando o excesso virtual antes mesmo da materialização física.

3.4 Aprofundamento Algorítmico: O Design do Acaso Controlado

A implementação da "Gramática Jundu" supera a modelagem geométrica convencional ao integrar dois conceitos fundamentais: a parametrização e a estocástica. A parametrização funciona como o código genético da estrutura, definindo as regras imutáveis do sistema, como a hierarquia de espessura dos tubos e os ângulos base de ramificação. Contudo, a aplicação rígida dessas regras resultaria em uma repetição mecânica, desconectada da organicidade do ecossistema costeiro.

Para romper com essa linearidade, introduziu-se a lógica estocástica — ou aleatoriedade controlada —, que atua como um fator de ruído adaptativo a cada nova ramificação. No algoritmo, isso significa que os ângulos e comprimentos dos estolões não são fixos; eles sofrem variações probabilísticas moderadas em torno dos eixos principais, mimetizando a resposta das plantas a microvariações ambientais de luz e vento.

Essa "imperfeição programada" desloca o papel do arquiteto: em vez de determinar a posição final de cada vértice, o designer orquestra protocolos de crescimento. O resultado é um *bioscaffold* que deixa de ser um objeto meramente desenhado para tornar-se uma estrutura cultivada digitalmente, cuja forma emerge de um equilíbrio entre o rigor matemático e o acaso controlado. Essa abordagem facilita a integração morfológica com o terreno dinâmico da praia, criando uma geometria que, embora gerada por computador, possui a diversidade visual e funcional encontrada nos sistemas biológicos.

3.5 Morfogênese Digital: Do Esqueleto à Porosidade Programada

A geração volumétrica do *bioscaffold* ocorre através de um processo de "espessamento paramétrico", no qual o esqueleto vetorial gerado pelo algoritmo é convertido em geometria sólida. Nesta etapa, a espessura dos filamentos varia conforme a hierarquia de crescimento: segmentos basais

recebem maior seção transversal para suporte estrutural, enquanto as ramificações periféricas tornam-se progressivamente mais finas.

O resultado é uma matriz porosa contínua que, diferentemente de uma malha aleatória, preserva a lógica direcional da planta original (*Ipomoea pes-caprae*). Essa configuração cria canais desobstruídos que funcionam como guias para que a vegetação real recolonize a estrutura, protegendo os tecidos vegetais jovens contra a abrasão do vento e do sedimento eólico.

Ao integrar o conceito de "Materialidade Bio-Digital", este espessamento é calibrado para gerar o que Cruz e Beckett (2016) definem como uma "casca arquitetônica" (*architectural bark*): uma superfície cuja porosidade programada e rugosidade intrínseca são desenhadas para serem ativamente colonizadas. Assim, a morfogênese digital do objeto não termina na sua forma física, mas na criação de um metabolismo hospedeiro capaz de sustentar a sucessão ecológica ao longo do tempo.

Figura 3 Renderização 3D do Bio-Scaffold.



Fonte Elaborada pelos autores com auxílio da IA Generativa do Google, 2026.

3.6. Desafios da Materialização: Manufatura Aditiva e Complexidade

A transição do modelo digital (L-System) para o objeto físico impõe desafios específicos de fabricação. A geometria ramificada e cheia de balanços (*overhangs*¹⁵) gerada pelo algoritmo, embora ideal para a performance ecológica, é complexa para os métodos tradicionais de concretagem. Por isso, a pesquisa adota a Impressão 3D de Concreto (3DCP¹⁶ – *3D Concrete Printing*) como método construtivo preferencial, cujos estudos de viabilidade e prototipagem física direcionam-se à infraestrutura de ponta do DCLab-HUBIC¹⁷.

A viabilidade de imprimir a "Gramática Jundu" reside na tradução de uma rede tridimensional de vetores em uma pilha estável de camadas bidimensionais. O principal desafio reside nos balanços — partes da estrutura que se projetam no espaço sem apoio direto. Para resolver isso, a acomodação das camadas no *bioscaffold* baseia-se em três estratégias projetuais interdependentes:

1. **Geometria de Auto-suporte:** O próprio algoritmo L-System foi parametrizado com restrições físicas, mantendo ângulos de ramificação predominantemente abaixo de 45° em relação à vertical. Isso garante que cada nova camada tenha pelo menos 50–60% de sua base apoiada na anterior, criando uma "escultura de equilíbrio" projetada para se sustentar durante a cura do material.
2. **Fatiamento por Loops Contínuos:** O processo de *slicing* (fatiamento digital) converte o modelo em perímetros fechados e contínuos. O design garante um caminho ininterrupto para o bico extrusor, evitando pontos de fragilidade estrutural e eliminando a necessidade de depósitos de material isolados.
3. **Estética da Estratificação Funcional:** O resultado visual revela o processo de fabricação através de uma estrutura estriada. Como apontam Cruz e Beckett (2016), essa rugosidade intrínseca da

¹⁵ **Overhangs:** na impressão 3D, refere-se aos "balanços". São partes de uma peça que se projetam no ar sem apoio direto abaixo, desafiando a gravidade durante a deposição do material fresco.

¹⁶ **3DCP (3D Concrete Printing):** impressão 3D de concreto. Tecnologia que utiliza braços robóticos para extrusar camadas sucessivas de argamassa, construindo formas complexas sem a necessidade de moldes.

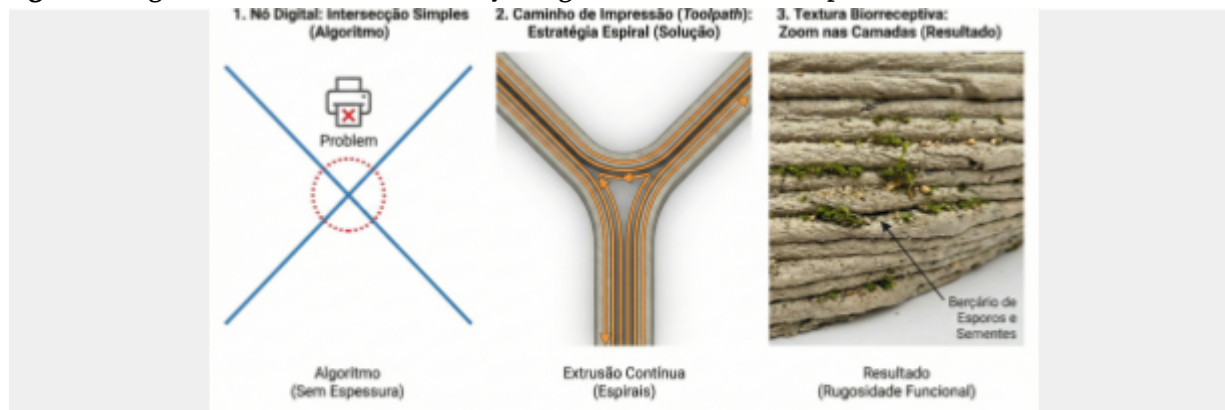
¹⁷ **DCLab-HUBIC:** digital Construction Lab – Hub de Inovação e Construção Digital. Trata-se de um laboratório de investigação avançada vinculado à FAUUSP, focado em manufatura digital, robótica aplicada à construção e inovação em processos de canteiro de obras.

impressão 3D não é um defeito de acabamento, mas uma funcionalidade deliberada.

Esta estratificação produz o que se define como "**porosidade programada**": os degraus entre as camadas criam micro-habitat e recessos que favorecem a retenção de umidade, sedimentos e esporos. Segundo os estudos de Manso Blanco (apud CRUZ; BECKETT, 2016), tais características geométricas de superfície são fundamentais para a biorreceptividade, pois reduzem a exposição ao vento e facilitam o estabelecimento de agentes biológicos espontâneos. Assim, a limitação construtiva da manufatura aditiva converte-se ativamente na principal vantagem ecológica do *bioscaffold*.

A lógica de fatiamento exige, por fim, uma reinterpretação dos nós de ramificação. Desenvolveu-se uma estratégia de "percurso contínuo em espiral", onde o robô desenha as camadas sem interromper o fluxo de material. A resolução das camadas (entre 10 e 20 mm) cria micro-fissuras que servem como berçários para sementes, acelerando o processo de bio-incrustação que transformará o bioconcreto cinza em uma infraestrutura viva.

Figura 4 Diagrama do Processo de Fabricação Digital e Textura Biorreceptiva



Fonte Elaborada pelos autores com auxílio da IA Generativa do Google, 2026.

4. Resultados e Discussão: Infraestrutura como Ecologia

O produto desta pesquisa, o "Bioscaffold Costeiro", é um artefato de bioconcreto permeável cuja morfologia desafia a tipologia tradicional. Enquanto a engenharia convencional opera através da reflexão de energia (muros lisos), o modelo gerado pelo *L-System* opera através da dissipação e permeabilidade. A complexidade geométrica dos "tubos" entrelaçados

funciona como um quebra-vento natural, reduzindo a velocidade do ar junto ao solo e forçando a deposição da areia transportada (efeito de rugosidade aerodinâmica). Em vez de bloquear a duna, a estrutura induz a sua formação.

4.1 Materialidade Biorreceptiva e Recursos Locais

Em iniciativas análogas de engenharia natural, observa-se frequentemente o uso de materiais de base puramente orgânica. Contudo, em praias de enseada expostas a ressacas de altíssima energia hidrodinâmica, esses substratos tendem a ser carregados antes que a vegetação consiga estabelecer-se estruturalmente. Para este projeto, propõe-se o uso de um **bioconcreto de matriz otimizada**, formulado a partir da integração de recursos naturais da área, como areia de jazidas locais e resíduos de conchas trituradas provenientes da própria orla.

O bioconcreto atua como um *bioscaffold* de transição, cuja inércia de massa fornece a estabilidade temporária indispensável para a retenção de areia nos primeiros anos de implantação. Esta proposta de "litologia artificial" não apenas reduz o impacto ambiental associado ao transporte de agregados virgens, como também aumenta a biorreceptividade superficial. A integração de minerais locais cria um microambiente químico mais próximo das condições naturais, favorecendo a fixação inicial de biofilmes e, subsequentemente, o desenvolvimento do sistema radicular da *Ipomoea pes-caprae*.

A viabilidade deste sistema exige uma materialidade que transcenda a função estrutural e atue como um suporte ativo à vida. Segundo Cruz e Beckett (2016), a biorreceptividade deve ser compreendida como um fenômeno de design que integra a performance ambiental à performatividade biológica da arquitetura.

Propõe-se, assim, o uso de matrizes cimentícias cuja geometria e composição mimetizam as propriedades de rochas naturais. Essa abordagem encontra ressonância nos estudos de Manso Blanco (apud CRUZ; BECKETT, 2016), que demonstrou como a calibração das propriedades físicas e químicas do concreto — como porosidade e rugosidade intrínseca — favorece o crescimento de criptógamos de forma autônoma, sem a dependência de sistemas externos de irrigação. Através desse controle morfológico, o *bioscaffold* atua como um substrato

catalisador, transformando a infraestrutura técnica em um berçário ecológico que evolui em simbiose com o metabolismo costeiro.

4.2 O Cotidiano da Paisagem Regenerada: Design Multiespécie

A chamada deste dossiê convoca-nos a refletir sobre como o design pode "semear futuros" na dimensão do cotidiano. A infraestrutura costeira tradicional, ao erguer muros cegos, sequestra o horizonte e transforma a praia em um espaço de defesa, não de convivência. Em contraste, o *bioscaffold* propõe uma pedagogia diferente para o dia a dia da cidade balneária. Ao fragmentar a barreira monolítica em uma série de módulos porosos e orgânicos, o projeto devolve a escala humana à orla, permitindo que essas estruturas sejam apropriadas como mobiliário urbano híbrido — servindo como bancos, apoios para contemplação ou barreiras visuais suaves.

Mais importante, o *bioscaffold* introduz a dimensão do "tempo" na experiência cotidiana da paisagem. Diferente de um muro que permanece estático até o seu colapso, a duna digital possui morfodinâmica viva. O morador ou turista que caminha pela praia observa, semana a semana, a transformação do objeto: o acúmulo de areia após uma ventania, o surgimento das primeiras folhas de *Ipomoea* após a chuva e o desaparecimento progressivo do bioconcreto sob o tapete verde.

Essa visibilidade do processo regenerativo reconecta o cidadão com os ciclos naturais, transformando a infraestrutura de um plano de fundo invisível em uma figura central de cuidado e observação. Semear futuros, neste caso, significa cultivar uma nova atenção para com as dinâmicas de remediação do território, onde o design atua como mediador de um cotidiano compartilhado entre humanos e outras espécies.

4.3 Cronobiologia da Infraestrutura: Sucessão Ecológica

Uma dimensão crítica do design regenerativo é a consideração do tempo não como fator de degradação, mas de maturação. A infraestrutura cinza tradicional segue uma curva de desempenho descendente: sua performance máxima ocorre na inauguração e decai gradualmente até o colapso. O *bioscaffold* propõe uma curva ascendente, baseada no princípio

da sucessão ecológica. Previu-se um ciclo de vida em três estágios para a intervenção:

1. **Estágio 1 (0-12 meses) – Prótese Mecânica:** A estrutura de bioconcreto atua de forma puramente mecânica, retendo a areia transportada pelo vento e protegendo o banco de sementes existente. É a fase em que o artifício fornece a estabilidade necessária para que o sistema biológico comece a se organizar.
2. **Estágio 2 (1-5 anos) – Colonização e Simbiose:** Conforme os estudos de Manso Blanco (apud CRUZ; BECKETT, 2016), inicia-se a colonização por criptógamas facilitada pela porosidade e rugosidade da impressão 3D. Simultaneamente, os estolões da *Ipomoea* utilizam os canais do *bioscaffold* como suporte de ancoragem contra marés excepcionais, iniciando o processo de bio-incrustação que integra a estrutura à biomassa local.
3. **Estágio 3 (+10 anos) – Invisibilidade Programada:** Espera-se o soterramento parcial ou total da estrutura pela duna consolidada. O bioconcreto, agora invisível, permanece como um esqueleto interno da duna, garantindo sua resiliência contra eventos extremos de erosão, enquanto a paisagem superficial retorna à sua aparência natural.

Este "desaparecimento programado" é o objetivo final do projeto: o sucesso do design é medido pela sua invisibilidade futura, onde a infraestrutura deixa de ser um objeto estranho para tornar-se o núcleo geológico de um ecossistema restaurado.

4.4 Síntese: A Tectônica Biodigital Jundu

A "Tectônica Biodigital Jundu" não é apenas um método construtivo, mas uma nova ontologia material para infraestruturas costeiras no Antropoceno. Ela define-se por uma simbiose indissociável entre três agentes fundamentais: o *bioscaffold* (o arcabouço técnico de bioconcreto), a planta (a vitalidade morfológica do Jundu) e a deposição da areia (o fator morfogenético abiótico impulsionado pelo vento).

Esse paradigma alinha-se ao conceito de "Ecologia Material" estabelecido por Neri Oxman (2020), no qual o design computacional e a fabricação digital operam integrados aos processos biológicos, permitindo

que os objetos sejam informados pelo seu ecossistema. Diferente da tectônica moderna, baseada na montagem de elementos discretos e padronizados, a tectônica Jundu é fibrosa e contínua. Suas características fundamentais são:

1. **Estrutura Reticular Não-Hierárquica:** Inspirada na *Ipomoea pes-caprae*, a estrutura é uma trama rizomática de vetores de bioconcreto que se auto-suportam. A estabilidade deriva do entrelaçamento dos "ramos", gerando rigidez através da complexidade da malha, similar a um sistema radicular exposto.
2. **Estética da Deposição Viscosa:** A expressão material é dominada pelo processo de Manufatura Aditiva, onde a forma final atua como um registro do tempo de impressão. A tectônica revela-se na acumulação de camadas — "cicatrizes" do movimento robótico — que criam uma textura háptica assemelhada a formações geológicas sedimentares.
3. **Porosidade Funcional (O Vazio como Matéria):** Na tectônica Jundu, o vazio é o elemento estruturante. Os espaços entre os filamentos são "alvéolos de biorreceptividade", desenhados para capturar o vento, reter areia e acumular umidade. O objeto deixa de ser uma forma fechada para tornar-se uma membrana permeável que convida a paisagem a colonizá-lo.

5. Conclusão: O Código como Fertilizante

A proposta "Dunas Digitais" busca demonstrar que a alta tecnologia e a sabedoria ecológica não são vetores opostos, mas forças complementares indispensáveis para enfrentar a emergência climática. Ao utilizarmos L-Systems para decodificar a inteligência de crescimento do Jundu, o design computacional deixa de ser uma ferramenta de imposição formal para se tornar um instrumento de escuta e tradução da natureza. Semear futuros exige que superemos a visão do design como produção de objetos imutáveis; o *bioscaffold* não é o fim do projeto, mas seu suporte inicial.

Conclui-se que a regeneração das paisagens costeiras depende dessa hibridização: o uso de "algoritmos raiz" integrados a uma materialidade biorreceptiva. O papel do designer contemporâneo desloca-se da figura de autor solitário para a de mediador entre sistemas técnicos e biológicos,

projetando as condições para que a natureza possa remediar os efeitos da antropização.

A presente pesquisa configura-se como um projeto interdisciplinar de caráter experimental que parte do princípio de que a união de conhecimentos de áreas distintas — como a **biologia do desenvolvimento** (*developmental biology*), a **matemática de sistemas não lineares** e a **bioquímica** — permite revisar as bases da arquitetura em seus fundamentos mais profundos. Ao investigar temas como a biomaterialidade, o design multiespécie e a biomimética processual, o trabalho visualiza a possibilidade de converter especulações conceituais em materialidades projetuais concretas. Semear futuros, nesse contexto, significa estabelecer a matriz metodológica necessária para que a teoria informe a prática, transformando a infraestrutura em um suporte vivo para a resiliência urbana e ecológica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP) através do Edital FUSP Multidisciplinar Sobre Mudanças Climáticas – 2025, bem como o apoio institucional e de infraestrutura fornecido pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) e pelo DCLab USP (Laboratório Multiusuário da USP) para o desenvolvimento deste estudo.

Referências

- ASCOTT, Roy. *Telematic Embrace: Visionary Theories of Art, Technology, and Consciousness*. Berkeley: University of California Press, 2003.
- BENYUS, Janine M. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow & Co., 1997.
- CRUZ, Marcos; BECKETT, Richard. *Bioreceptive design: a novel approach to biodigital materiality*. Architectural Research Quarterly, v. 20, n. 1, p. 51-64, 2016.
- GOAD, Alex. *MARS: Modular Artificial Reef Structure*. Reef Design Lab, Melbourne, 2018.
- HUI, Yuk. *The Question Concerning Technology in China: An Essay in Cosmotechnics*. Falmouth: Urbanomic, 2016.

- INGOLD, Tim. **Being Alive: Essays on Movement, Knowledge and Description**. London: Routledge, 2011.
- KWINTER, Sanford. **Architectures of Time: Toward a Theory of the Event in Modernist Culture**. Cambridge: MIT Press, 2002.
- LATOUR, Bruno. **Facing Gaia: Eight Lectures on the New Climatic Regime**. Cambridge: Polity Press, 2017.
- LINDENMAYER, Aristid; PRUSINKIEWICZ, Przemyslaw. **The Algorithmic Beauty of Plants**. New York: Springer-Verlag, 1990.
- MANSO BLANCO, Sandra. **Bioreceptive concrete**. 2014. Tese (Doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2014 (citada em Cruz e Beckett, 2016).
- MANSO, Sandra; DE MUYNCK, Willem; SEGURA, Ignacio; AGUADO, Antonio; STEPPE, Kathy; BOON, Nico; DE BELIE, Nele. **Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation**. *Science of the Total Environment*, v. 481, p. 232-241, 2014.
- McHARG, Ian L. **Design with Nature**. Garden City: Natural History Press, 1969.
- MORTON, Timothy. **Dark Ecology: For a Logic of Future Coexistence**. New York: Columbia University Press, 2016.
- MUSTAFA, K. F.; PRIETO, A.; OTTELE, M. **The role of geometry on a self-sustaining bio-receptive concrete panel for facade application**. *Sustainability*, v. 13, n. 13, p. 7453, 2021.
- OXMAN, Neri. **Material Ecology**. New York: The Museum of Modern Art, 2020.
- RATTIS, Ludmila et al. **Climate change and coastal erosion in the Brazilian Southeast**. *Ocean & Coastal Management*, v. 165, p. 1-13, 2018.
- STENGERS, Isabelle. **No Tempo das Catástrofes: Resistir à barbárie que vem**. São Paulo: Cosac Naify, 2015.
- WATSON, Julia. **Lo-TEK: Design by Radical Indigenism**. Cologne: Taschen, 2020.
- YU, Vriko; BAKER, David. **Archireef: 3D-Printed Terracotta Reef Tiles**. Swire Institute of Marine Science, 2020.
- ZAHA HADID ARCHITECTS. **Nereid: Marine ecosystem restoration**. Projeto de habitat marinho impresso em 3D. Londres, 2025. Disponível em publicações do *World Design Congress 2025*. Acesso em: 28 abr. 2026.

Recebido: 18/02/2026
Aceito: 12/05/2026
Publicado: 13/07/2026

Editoras–Chefe:

 Barbara Necyk

 Carolina Noury

© Copyrights: Adriana
Lima; Arthur Lara

A revista Arcos Design
está licenciada sob uma
licença Creative
Commons Atribuição –
Não Comercial –
Compartilha Igual 4.0.

Não Adaptada.



Participação da autoria:

Adriana Lima: conceituação, metodologia, investigação, design da apresentação de dados, redação - manuscrito original, redação - revisão e edição.

Arthur Lara: supervisão, administração do projeto, obtenção de financiamento.

Fonte de Financiamento:

Fonte de Financiamento: Edital FUSP Multidisciplinar Sobre Mudanças Climáticas 2024; Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP).

Conflito de Interesse:

Declaramos não haver conflitos de interesse.