

POTENCIALIDADES E DESAFIOS DA EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS COM COBERTURA ESPACIAL NO CONTEXTO DA ENGENHARIA CIVIL CONTEMPORÂNEA

Engenharias, Volume 30 – Edição 155/FEV 2026 / 04/02/2026

REGISTRO DOI: 10.69849/revistaft/ma1020260020852

Leonardo Magalhães Cavalcante da Silva

Lucas Aires Ramos

Carolyne Amélia Assis Ávila

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise crítica das coberturas espaciais, abordando suas potencialidades e desafios no contexto da engenharia civil contemporânea. Essas estruturas, formadas por sistemas tridimensionais que distribuem esforços de forma equilibrada, permitem vencer grandes vãos sem apoios intermediários, criando espaços amplos e versáteis para diferentes usos, como instalações esportivas, culturais e industriais. O objetivo geral foi analisar criticamente aspectos como viabilidade técnica, métodos construtivos, comportamento estrutural, sustentabilidade e custos. A metodologia utilizada baseou-se em revisão bibliográfica, fundamentada em livros, artigos científicos, publicações técnicas e normas especializadas, reunindo informações sobre conceitos,

tipologias, aplicações e desempenho das coberturas espaciais. Os resultados indicaram vantagens técnicas relevantes, como eficiência estrutural, redução de peso próprio, modularidade e pré-fabricação, que otimizam a execução e reduzem desperdícios. No campo arquitetônico, oferecem liberdade de formas e soluções inovadoras, além de potencial para integração de estratégias ambientais. Contudo, a execução impõe desafios, como necessidade de controle geométrico rigoroso, detalhamento preciso das ligações, logística de transporte, sequência adequada de montagem e inspeção de qualidade. Conclui-se que as coberturas espaciais, quando projetadas e executadas de forma integrada, conciliam desempenho técnico, estética e sustentabilidade. No entanto, seu sucesso depende de planejamento detalhado, tecnologias adequadas e gestão eficiente de todas as etapas.

Palavras-chave: Coberturas espaciais. Estruturas tridimensionais. Engenharia civil.

ABSTRACT

This study presents a critical analysis of space frame structures, addressing their potential and challenges within the context of contemporary civil engineering. These structures, composed of three-dimensional systems that evenly distribute loads, allow for spanning large distances without intermediate supports, creating wide and versatile spaces for various uses, such as sports, cultural, and industrial facilities. The main objective was to critically evaluate aspects such as technical feasibility, construction methods, structural behavior, sustainability, and costs. The methodology adopted was a literature review based on books, scientific articles, technical publications, and specialized standards, gathering information on the concepts, typologies, applications, and performance of space frame structures. The results indicated significant technical advantages, such as structural efficiency, reduced self-weight, modularity, and prefabrication, which optimize construction processes and reduce waste. From an architectural perspective, they offer freedom

of form and innovative solutions, as well as the potential for integrating environmental strategies. However, execution poses challenges such as the need for rigorous geometric control, precise detailing of connections, transportation logistics, appropriate assembly sequences, and quality inspection. It is concluded that, when designed and executed in an integrated manner, space frame structures combine technical performance, aesthetics, and sustainability. Nevertheless, their success depends on detailed planning, appropriate technologies, and efficient management at all stages.

Keywords: Space frames. Three-dimensional structures. Civil engineering.

INTRODUÇÃO

Do ponto de vista histórico, as estruturas espaciais têm antecedentes que remontam ao século XVIII, quando soluções de grande vão eram alcançadas sobretudo por meio de treliças planas e arcos treliçados, ainda com lógica predominantemente bidimensional e com pouca padronização construtiva. A concepção verdadeiramente tridimensional com malhas capazes de redistribuir esforços em várias direções ganha tração apenas no início do século XX. Em 1907, Alexander Graham Bell apresentou um reticulado espacial constituído por barras de mesmo comprimento conectadas por um nó padronizado, combinação que incrementou a capacidade resistente e abriu caminho para aplicações modulares e repetitivas em coberturas de grande vão (Souza, 1998).

Nessa mesma linha, a classificação discutida por Martini (2014) elenca como exemplos correntes de treliças espaciais as malhas planas em camadas, os arcos treliçados e as cúpulas, citando o arranjo desenvolvido por Bell como um marco pioneiro que antecipou o emprego de elementos padronizados e conexões específicas em sistemas tridimensionais. Desse modo, a passagem das treliças e arcos tradicionais para reticulados espaciais com geometria e nós sistematizados representa um salto conceitual e tecnológico que embasa as coberturas

contemporâneas, ao combinar modularidade, rigidez global e potencial de montagem industrializada (Martini, 2014).

As coberturas espaciais vêm ocupando um papel de destaque na engenharia e na arquitetura contemporânea, configurando-se como sistemas estruturais de alta complexidade que conciliam desempenho técnico avançado, expressividade arquitetônica e racionalidade no uso de materiais. Segundo Barth, Vefago e Vasconcelos (2023), essas estruturas se caracterizam por sua capacidade de vencer grandes vãos sem a necessidade de apoios intermediários, possibilitando a criação de ambientes amplos, flexíveis e visualmente impactantes. Além de seu potencial estético, Xavier, Meyer e Lunardi (2015) ressaltam que o arranjo geométrico tridimensional e o comportamento de distribuição das cargas conferem elevada eficiência estrutural, permitindo otimizar a quantidade de material empregado e reduzir o peso próprio da estrutura.

Do ponto de vista da viabilidade técnica, Silva e Souza (2014) apontam que a adoção de coberturas espaciais exige um rigoroso estudo preliminar de cargas, deformações e conexões, visto que a estabilidade global depende da interação entre todos os elementos que compõem a malha estrutural. No que se refere aos métodos construtivos, o emprego de módulos pré-fabricados tem se mostrado uma alternativa recorrente, possibilitando rapidez na montagem, padronização de componentes e redução de desperdícios (Novaes *et al.*, 2024).

No campo do comportamento estrutural, Martini (2014) indica que a geometria espacial permite uma distribuição uniforme dos esforços, conferindo maior resistência às ações dinâmicas, como vento e sismos, quando comparadas a sistemas bidimensionais convencionais. Entretanto, essa vantagem estrutural requer precisão no processo de fabricação e montagem, pois erros dimensionais podem comprometer a estabilidade global e a integridade da cobertura.

A sustentabilidade também desponta como um fator determinante na avaliação dessas soluções. Conforme Souza (2002), a durabilidade dos materiais, a possibilidade de reutilização dos módulos e a integração de sistemas de captação de energia solar ou de aproveitamento da iluminação natural contribuem para reduzir o impacto ambiental e ampliar o ciclo de vida útil da estrutura. Ainda assim, a viabilidade ambiental deve ser ponderada considerando o custo energético da produção e do transporte dos elementos. Graff (2015) destaca que, embora o investimento inicial em coberturas espaciais possa ser mais elevado que o de soluções tradicionais, a durabilidade, a baixa manutenção e a flexibilidade de uso dos espaços cobertos podem resultar em economia a médio e longo prazo. A decisão pela adoção desse sistema, portanto, deve equilibrar custo inicial, benefícios funcionais, impacto ambiental e valor estético agregado.

Dessa forma, de que maneira as potencialidades e os desafios técnicos, construtivos, econômicos e sustentáveis influenciam a adoção e a execução de coberturas espaciais na engenharia civil contemporânea, considerando seus benefícios estruturais, arquitetônicos e ambientais, bem como o impacto no cronograma físico e financeiro das obras?

O presente estudo tem como objetivo geral realizar uma análise crítica das potencialidades e dos desafios relacionados à execução de coberturas espaciais, considerando aspectos como viabilidade técnica, métodos construtivos, comportamento estrutural, sustentabilidade e custos. De forma específica, busca-se apresentar os principais tipos de coberturas espaciais e suas aplicações, discutir os benefícios estruturais, arquitetônicos e ambientais desse sistema, identificar os principais desafios enfrentados nas etapas de projeto e execução, além de avaliar o impacto que esse tipo de cobertura exerce sobre o cronograma físico e financeiro das construções.

A crescente demanda por grandes vãos livres em edificações, aliada à busca por soluções arquitetônicas arrojadas e sustentáveis, tem

impulsionado o uso de coberturas espaciais. No entanto, sua execução ainda enfrenta barreiras técnicas e logísticas, que exigem conhecimento específico e planejamento integrado entre engenheiros e arquitetos. O estudo proposto é relevante para ampliar o entendimento técnico e fomentar o uso consciente desse tipo de estrutura no cenário brasileiro.

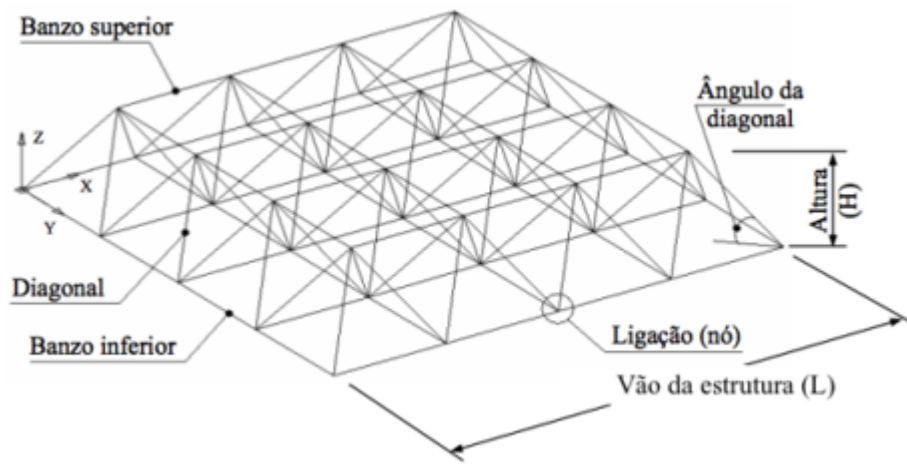
O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, fundamentada na análise de publicações científicas, livros, artigos técnicos e normas especializadas, com foco no estudo de coberturas espaciais e seus diferentes sistemas estruturais, como treliças espaciais, domos geodésicos e grid shells. Esse tipo de pesquisa busca reunir, sistematizar e discutir o conhecimento já produzido sobre o tema, permitindo compreender suas potencialidades, limitações, métodos construtivos e impactos no contexto da engenharia civil contemporânea.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Conceitos e tipos de coberturas espaciais

As coberturas espaciais (figura 1) são sistemas estruturais tridimensionais concebidos para vencer grandes vãos com baixo peso próprio, alto grau de modularidade e bom desempenho na redistribuição de esforços entre barras e nós (Magalhães, 1996). Diferem das estruturas planas porque trabalham em rede tridimensional, com caminhos redundantes de carga e grande rigidez fora do plano, o que permite cobrir ambientes amplos com poucos apoios e liberdade formal para a arquitetura (Chilton, 2007).

Figura 1 – Elementos de uma cobertura espacial



Fonte: Magalhães, 1996.

Makowski (1981) destaca que as coberturas espaciais podem ser classificadas em famílias que compartilham princípios mecânicos e construtivos, tais como treliças espaciais (*space frames/space grids*), domos geodésicos, *gridshells*, estruturas tensionadas de cabos e membranas, estruturas de tensegridade e estruturas pneumáticas. Cada uma dessas categorias associa uma lógica geométrica como triangulação, dupla curvatura ou malhas rebatidas a um modo predominante de trabalho estrutural, seja tração, compressão, casca ou rede pretensionada, o que resulta em diferentes vantagens de desempenho, exigências específicas de conexões e métodos particulares de montagem.

As treliças espaciais são malhas reticuladas tridimensionais formadas por barras predominantemente tracionadas/comprimidas conectadas por nós esféricos ou chapas/luas, usualmente em camada dupla (*double-layer*) para ganhar rigidez, embora variantes de camada simples e múltiplas também existam. A triangulação e a altura da treliça controlam a rigidez global; os módulos mais comuns são tetraédricos, piramidais e cuboctaédricos. A padronização de nós (como sistemas tipo MERO) e o pré-fabrico de módulos aceleram a montagem e reduzem desperdícios (Chilton, 2007).

Em termos de comportamento, a distribuição tridimensional dos elementos cria múltiplos caminhos de carga, o que melhora a robustez

global; por outro lado, a segurança depende criticamente do desempenho das ligações e do controle geométrico durante a montagem. Pesquisas recentes reforçam que o tipo de nó e sua rigidez local governam a capacidade global e as formas de colapso, tema recorrente em estudos experimentais e numéricos com barras tubulares (Silva *et al.*, 2020).

Os domos geodésicos são cascas aproximadas por malhas trianguladas sobre esferas ou superfícies sinclásticas; a triangulação confere elevada rigidez com massa mínima. Popularizados por R. Buckminster Fuller a partir da década de 1950, tornaram-se um ícone de coberturas leves e pré-fabricadas. O sistema foi protegido por patentes que detalham a lógica de subdivisão geodésica e de montagem modular (Fuller, 1954). As gridshells são cascas de dupla curvatura construídas com uma grade de elementos lineares (madeira, aço, compósitos) que, após conformação, passa a trabalhar como casca. Ao contrário das treliças espaciais, a resistência e a rigidez decorrem da dupla curvatura (sinclástica/anticlástica) e do acoplamento membrana–flexão característicos de cascas finas. Frei Otto e Ted Happold foram pioneiros no método de “form-finding” e na execução da Multihalle de Mannheim (1975), referência histórica do sistema; décadas depois, o Weald e Downland Gridshell consolidou o uso em madeira verde com técnicas atualizadas (Happold; Liddell, 1975).

Douthe, Baverel e Caron (2006), apontam que o traçado das coberturas espaciais resulta de processos de busca de forma, como modelos pendurados, *dynamic relaxation* e análise pelo método dos elementos finitos não linear, visando alcançar estados de baixa energia e estabilidade global sob cargas usuais. Esses autores também evidenciam que há uma ampla produção científica recente dedicada a critérios de estabilidade, detalhamento de ligações e técnicas de produção ou laminação de réguas, fundamentais para o desempenho e a durabilidade dessas estruturas.

As estruturas a cabos e membranas também chamadas de estruturas tensionadas baseiam-se na pré-tração para estabilizar superfícies delgadas que trabalham majoritariamente à tração, com geometria de dupla curvatura anticlástica em coberturas tipo “sela” ou sinclástica em sistemas pressurizados. A obra clássica de Frei Otto sistematiza o cálculo e o dimensionamento de cabos, redes e membranas, detalhando materiais, bordas, ancoragens e o uso de modelos físicos para a forma (Otto, 1966). Guias contemporâneos, como Seidel (2009), descrevem de forma prática materiais (PTFE/fibra de vidro, PVC/poliéster, ETFE), detalhes de borda (cabos de contorno, cintas, keder), padrões de corte e sequências de montagem, além de critérios de durabilidade/coatings e manutenção (Seidel, 2009). Cabos em redes (cable nets) e coberturas com mastros e tirantes combinam eficiência de material e transparência, mas exigem controle rigoroso de flechas, vibrações e estados de pretensão ao longo da vida útil (Seidel, 2009).

Em tensegridade, barras comprimidas “flutuam” dentro de uma rede contínua de cabos tracionados; a autoestressagem (pretensão inicial) confere forma e rigidez globais. René Motro sistematiza a teoria, topologias básicas (prismas, domos, pontes) e métodos de análise, discutindo também sensibilidade geométrica, modos de instabilidade e estratégias de montagem (Motro, 2012). A leveza extrema e a montagem “dobrável” tornam a tensegridade promissora para coberturas temporárias e sistemas implantáveis/transformáveis, embora a aplicação em grandes vãos ainda dependa de soluções robustas de nós, bloqueios de cabo e controle preciso de tensões (Motro, 2012).

As pneumáticas empregam pressão interna de ar para estabilizar membranas, seja suportando todo o envelope (air-supported) com cabos de ancoragem perimetral, seja inflando células (air-inflated) que funcionam como “vigas” pneumáticas. A referência de Frei Otto compila princípios de cálculo, materiais e critérios de segurança (comportamento sob vento, perda de pressão, redundâncias) (Otto, 1973)

2.2 Vantagens técnicas e arquitetônicas

As coberturas espaciais consolidaram-se, ao longo das últimas décadas, como uma das soluções estruturais mais versáteis e eficientes no contexto da engenharia civil e da arquitetura contemporânea. Sua adoção em projetos de grande porte não se deve apenas ao apelo estético que proporcionam, mas, sobretudo, à combinação de desempenho estrutural, racionalidade construtiva e potencial de integração com conceitos de sustentabilidade. No campo técnico, essas estruturas se destacam por sua capacidade de vencer grandes vãos livres, geralmente superiores a 30 metros, sem a necessidade de apoios intermediários. Essa característica resulta de sua configuração tridimensional, que distribui os esforços de forma uniforme, proporcionando elevada rigidez global e reduzindo as deformações mesmo sob cargas significativas (Weiss, 2020).

O sistema reticulado espacial opera segundo princípios mecânicos que garantem redundância estrutural. Isso significa que, em caso de falha localizada, a redistribuição das forças entre os elementos restantes reduz a probabilidade de colapso global, aumentando a segurança da estrutura. Tal comportamento é especialmente vantajoso em coberturas de uso público, como estádios, ginásios, centros de convenções e terminais de transporte, onde a confiabilidade estrutural é requisito indispensável. Segundo Makowski (1981), essa redundância está diretamente associada à geometria modular e ao entrelaçamento das barras, que criam múltiplos caminhos de carga e aumentam a robustez contra ações acidentais e dinâmicas, como impactos, ventos fortes e até eventos sísmicos.

Outra vantagem técnica relevante é a leveza proporcionada pela racionalização do uso de materiais (figura 2) (Franco, 2018). Por se tratar de estruturas de alto desempenho, as coberturas espaciais requerem menos matéria-prima para atingir o mesmo nível de resistência de soluções convencionais, o que resulta em menor peso próprio. Essa característica não apenas reduz as cargas transmitidas às fundações, diminuindo custos de infraestrutura, mas também facilita o transporte e a montagem dos

elementos. Martha (2010) ressalta que essa economia de material, somada ao uso de componentes padronizados e pré-fabricados, contribui para a redução de resíduos sólidos, fortalecendo o alinhamento desse sistema construtivo às práticas de sustentabilidade.

Figura 2 – Aeroporto de Zagreb.



Fonte: Franco, 2018.

Além do baixo peso próprio, as coberturas espaciais em metálicas distinguem-se pela elevada resistência mecânica e pela ótima relação resistência–massa, característica de ligas como o aço e o alumínio. Esses materiais permitem vencer grandes vãos e suportar ações significativas sem comprometer a rigidez global, ao mesmo tempo em que oferecem ductilidade e versatilidade de detalhamento para conexões, nós e sequências de montagem. Quando combinadas com modelagem geométrica adequada e pré-fabricação, tais propriedades ampliam a liberdade de projeto, viabilizando formas complexas e soluções estruturais inovadoras que frequentemente resultam em coberturas de forte expressão arquitetônica e valor simbólico no tecido urbano (Magalhães, 1996).

A pré-fabricação dos módulos e a padronização das conexões são fatores que também influenciam diretamente na eficiência construtiva. De acordo com Ellwanger (2008), a montagem de coberturas espaciais é

caracterizada por processos industriais que possibilitam controle rigoroso de qualidade, rapidez de execução e previsibilidade de prazos. Essa industrialização reduz a interferência de variáveis climáticas no cronograma de obra, uma vez que a maior parte da produção é realizada em ambiente controlado, limitando as atividades no canteiro à montagem final. Em projetos de grande escala, essa vantagem se traduz em significativa economia de tempo e, conseqüentemente, de recursos financeiros.

No âmbito arquitetônico, as coberturas espaciais oferecem um leque de possibilidades formais que dificilmente é alcançado por outros sistemas estruturais. Sua geometria pode ser adaptada para criar superfícies planas, curvas ou de dupla curvatura, permitindo a concepção de espaços com identidade visual marcante. Essa liberdade formal não é meramente estética; ela pode ser explorada para otimizar a iluminação natural, direcionar fluxos de ventilação e integrar dispositivos de eficiência energética, como painéis fotovoltaicos e sistemas de captação de águas pluviais. Segundo Chilton (2007), a flexibilidade de forma permite que o engenheiro e o arquiteto trabalhem de maneira colaborativa desde as fases iniciais do projeto, garantindo que a estrutura não seja apenas um elemento de suporte, mas parte integrante da expressão arquitetônica da edificação.

Kripka (2021) destaca como aspecto arquitetônico relevante a criação de ambientes internos amplos, livres de colunas e obstruções visuais. Essa característica é especialmente valorizada em espaços voltados a eventos esportivos, culturais e comerciais, nos quais a visibilidade e a fluidez de circulação se tornam determinantes para a experiência do usuário. Segundo os autores, a ausência de apoios intermediários proporciona uma sensação de amplitude e liberdade, tornando o ambiente mais agradável e funcional. Ademais, a esbeltez das barras e a possibilidade de utilizar materiais translúcidos nas coberturas contribuem para a leveza visual, favorecendo a integração entre o espaço interno e o ambiente externo.

A adaptabilidade das coberturas espaciais também merece destaque. Sua estrutura modular permite ampliação, desmontagem e remontagem em outro local, característica que as torna ideais para projetos temporários ou eventos itinerantes. Kripka (2021) ressalta que essa capacidade de reaproveitamento é um diferencial relevante no cenário atual, em que práticas construtivas sustentáveis e flexíveis ganham cada vez mais importância. Em termos econômicos, essa flexibilidade reduz o desperdício e prolonga a vida útil dos elementos estruturais, maximizando o retorno sobre o investimento.

Chilton (2007) ressalta que as vantagens técnicas e arquitetônicas das coberturas espaciais não atuam de forma isolada, mas sim de maneira integrada. A eficiência estrutural influencia diretamente a liberdade formal, enquanto a racionalização construtiva viabiliza soluções arquitetônicas mais ousadas. Para o autor, a verdadeira força dessas estruturas está na capacidade de unir estética, funcionalidade e viabilidade técnica em um único sistema, atendendo simultaneamente às demandas de engenheiros, arquitetos e usuários finais. Dessa forma, as coberturas espaciais consolidam-se como uma solução de alto valor agregado, capaz de aliar inovação, desempenho e qualidade ambiental em projetos de diferentes escalas e tipologias.

2.3 Principais desafios na execução

A execução de coberturas espaciais impõe um conjunto de desafios que começam ainda nas fases iniciais de concepção e detalhamento e avançam pela cadeia de suprimentos, logística, montagem em campo e verificação de desempenho. No projeto, a dificuldade não se resume ao dimensionamento de barras, cascas ou membranas: a própria definição geométrica demanda processos de modelagem paramétrica, *form-finding* e análise não linear para garantir estados de equilíbrio compatíveis com os mecanismos resistentes pretendidos e com as ações de serviço, inclusive vento e variações térmicas (Van Mele *et al.*, 2012).

A literatura mostra que, para cascas e sistemas leves, a estabilidade global e os caminhos de carga mudam sensivelmente com pequenas alterações de forma, o que exige iterações entre geometria, análise e detalhamento (Adriaenssens *et al.*, 2014). Em paralelo, a coordenação entre disciplinas via BIM torna-se crítica para antecipar interferências em nós tridimensionais, rotas de drenagem, passagens de instalações, sequências de montagem e fracionamento em módulos transportáveis; quando negligenciada, ela produz “efeitos cascata” em prazos e custos no canteiro (Sacks *et al.*, 2018). Outro ponto sensível é o detalhe de ligações: tolerâncias de furação, rigidez de nós, procedimentos de aperto de parafusos e soldagens em peças tubulares precisam ser especificados com base em normas de execução, pois a rigidez local condiciona a resposta global e os modos de instabilidade do conjunto (EN 1090-2, 2018; ABNT, 2008). Em estruturas tensionadas, o problema soma a definição dos estados de pré-tração e das bordas (cabos, mastros e ancoragens), cuja compatibilização entre cálculo, padrões de corte e comportamento de longo prazo do material é decisiva para evitar rugas, *flutter* e perda de flecha (Forster; Chilton, 2004).

Superada a etapa de projeto, emergem os desafios de transporte e logística. A promessa de industrialização e repetição modular só se cumpre quando o fracionamento em painéis, nós e submontagens considera envelope de transporte, pesos por peça e capacidades de içamento no canteiro. A literatura de construção *off-site* mostra que ganhos de produtividade dependem de um equilíbrio entre grau de pré-montagem e transportabilidade: módulos muito grandes reduzem tempo de campo, mas elevam custo de escolta, riscos de dano e restrições de rota; módulos excessivamente pequenos aumentam conexões e tempo de junção, além de amplificar a “soma de tolerâncias” (Gibb, 1999). Para elementos metálicos acabados, a proteção de superfícies (galvanização, pintura ou revestimentos poliméricos) contra abrasão durante manuseio e viagem é crucial para não comprometer a durabilidade, implicando embalagens específicas, separadores e identificação de peças que facilitem o *picking* e a rastreabilidade no recebimento (EN 1090-2, 2018).

Na montagem, a principal dificuldade é transformar um modelo matemático “travado” em uma estrutura real com geometrias e tensões dentro de janelas estreitas. Em treliças e *space frames*, o avanço por baias requer planejamento de escoramentos temporários, checagens periódicas de cota e prumo, e sequências de fechamento que minimizem incompatibilidades geométricas especialmente em malhas de dupla curvatura. Em cabos e membranas, a ordem de tensionamento e a calibração de alongamentos determinam a forma final e a estabilidade; o processo precisa considerar a direção do vento, temperaturas de montagem e limites de flecha admissíveis, além do uso de células de carga e miras topográficas para aferição (Forster; Mollaert, 2004).

Sistemas transformáveis e anéis de compressão/cúpulas com tirantes exigem atenção a estados transitórios que não aparecem no modelo final, como flambagem local de anéis parcialmente fechados e inversão de esforços em painéis antes do travamento; procedimentos de comissionamento com medições incrementais ajudam a captar esses comportamentos (Gantes, 2001). Em todos os casos, metrologia com estação total, *laser scanner* e *as-built* progressivo reduz o risco de acúmulo de tolerâncias e retrabalhos, mas demanda equipes treinadas e protocolos bem definidos (Sacks *et al.*, 2018).

O controle de qualidade amarra todas as etapas por meio de requisitos técnicos, rastreabilidade e inspeções sistemáticas. Para estruturas de aço, a conformidade com normas de execução estabelece níveis de tolerância, classe de soldagem, qualificação de procedimentos (WPS/PQR), pré-carga de parafusos de alta resistência e critérios de inspeção (visual, líquido penetrante, partículas magnéticas e ultrassom) (EN 1090-2, 2018; AISC, 2016; ABNT, 2008). Em membranas e cabos, o controle envolve ensaios de costuras e soldas por alta frequência, verificação de gramaturas, testes de tração/rasgo e leitura de pré-tensões com equipamentos dedicados, além da checagem do padrão de corte e do comportamento no primeiro ciclo de carregamento (*bedding-in*) (Forster; Mollaert, 2004).

Sistemas de gestão da qualidade segundo ISO 9001 auxiliam a institucionalizar planos de inspeção e ensaio (PIE), fichas de verificação e registros de não conformidade, assegurando rastreabilidade de materiais (certificados de origem, lotes de parafusos, consumíveis de solda) e de medições geométricas ao longo do processo (ISO, 2015). Ao final, a verificação do desempenho em serviço incluindo monitoramento de deslocamentos, vibrações e tensões em elementos críticos tem sido adotada como estratégia de *commissioning* e *as-built* avançado, sobretudo em coberturas muito leves ou sujeitas a ações eólicas significativas (Adriaenssens *et al.*, 2014).

Dessa forma, a execução bem-sucedida de coberturas espaciais depende da coerência entre modelo geométrico, critérios de análise, detalhe construtivo, logística e inspeção. Os pontos de falha mais frequentes, ligações com rigidez não prevista, incompatibilidades de tolerâncias entre fábrica e campo, tensionamento inadequado e lacunas na rastreabilidade costumam ser sintomas de decisões fragmentadas. A literatura e as normas convergem para uma recomendação central: planejamento integrado e verificação contínua, do *form-finding* ao *as-built*, como condição para manter forma, resistência e durabilidade dentro do esperado (Sacks *et al.*, 2018).

2.4 Sustentabilidade e inovação tecnológica

A discussão contemporânea sobre coberturas espaciais não pode prescindir de uma análise consistente dos seus impactos ambientais ao longo do ciclo de vida e das oportunidades trazidas por tecnologias digitais e de fabricação avançada. Kibert (2016) argumenta que o desempenho sustentável da construção depende de três eixos interdependentes: redução de impactos incorporados, economia de energia operacional e circularidade de materiais, o que se ajusta particularmente bem à lógica leve e modular dos sistemas espaciais. Nessa perspectiva, a avaliação por Análise do Ciclo de Vida (ACV), normatizada pelas ISO 14040 e 14044, oferece o método-base para

quantificar emissões, energia incorporada e cargas ambientais desde a extração até o fim de vida (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Em estudos comparativos, Bribián, Capilla e Usón (2011) mostram que decisões de projeto e seleção de materiais podem produzir variações expressivas na energia embutida do envelope e da estrutura; Ashby (2012) complementa que ferramentas de seleção eco-informada permitem equilibrar desempenho mecânico com indicadores ambientais (CO₂, energia, toxicidade), favorecendo soluções de alta razão resistência–massa, um atributo típico das coberturas espaciais.

Do ângulo da carbonização incorporada, a literatura tem enfatizado que estruturas leves e repetitivas tendem a apresentar menores impactos por metro quadrado coberto quando comparadas a alternativas maciças com ele vão (Wolf; Pomponi; Moncaster, 2017). A modularidade de barras, nós e painéis facilita estratégias de padronização, reuso e remanufatura, com reflexos diretos na redução de resíduos e na extensão da vida útil. Em um panorama de economia circular, Wolf, Pomponi e Moncaster, (2017) propõem um arcabouço de projeto que privilegia materiais com rotas claras de retorno (reaproveitamento, reciclagem de aço e alumínio, reuso de nós), articulado a declarações ambientais de produto (EPD) em conformidade com a EN 15804, que criam transparência para escolhas com menor pegada ambiental (EN 15804, 2019). Gorgolewski (2008) acrescenta que projetar para desmontagem com ligações aparafusadas acessíveis, tolerâncias controladas e identificação de componentes é condição para que o potencial de circularidade das coberturas espaciais se materialize em canteiro e na etapa de desativação.

A energia operacional permanece em outro vetor central. Cabeza *et al.* (2014) destacam que decisões de forma, transmitância e propriedades óticas do envelope determinam o balanço energético em uso; essa leitura é especialmente relevante para coberturas extensas, onde controle de ganhos solares, ventilação natural e iluminação zenital afetam diretamente a demanda por climatização e iluminação artificial. No caso de materiais translúcidos, Robinson- Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2018)

analisam o emprego de ETFE em almofadas pressurizadas, evidenciando elevada transmitância luminosa, baixo peso e manutenção reduzida, com potencial para qualificar a luz difusa e minimizar cargas estruturais. Na fronteira dos “envelopes adaptativos”, Loonen *et al.* (2013) mapeiam dispositivos responsivos sombrite regulável, vidros eletrocromicos, cortinas pneumáticas que podem ser acoplados às malhas espaciais para modular trocas térmicas e luminosas em tempo real, elevando a eficiência sem sacrificar a expressividade formal da cobertura.

A inovação tecnológica também altera profundamente como projetamos e fabricamos coberturas espaciais. Kolarevic (2003) demonstra que fluxos paramétrico-generativos permitem explorar milhares de variações geométricas e, por meio de otimização multicritério, aproximar soluções que conciliam mínima massa, máxima rigidez e bom desempenho ambiental. Essa inteligência de forma tem se articulado com cadeias CNC e fabricação digital corte a laser de perfis tubulares, usinagem de nós esféricos, dobra precisa de chapas reduzindo perdas e assegurando tolerâncias estreitas. Gramazio e Kohler (2008) documentam o salto de qualidade na robótica de canteiro e de fábrica, em operações como soldagem, perfuração e montagem assistida, com benefícios diretos para a repetibilidade, a segurança e a produtividade elementos que, por consequência, reduzem o desperdício e a pegada ambiental do processo.

Outra frente de inovação é o monitoramento do ciclo de vida. Farrar e Worden (2012) mostram que sistemas de *Structural Health Monitoring* (SHM), baseados em sensores de fibra óptica, extensômetros e acelerômetros, conseguem capturar dano incipiente e recalibrar modelos numéricos, orientando manutenção preditiva e evitando intervenções corretivas de alta emissão. Esse ecossistema conecta-se ao conceito de gêmeo digital na construção, em que o modelo “vivo” da cobertura integra dados de projeto, fabricação, montagem e uso. Para Boje *et al.* (2020), a maturidade semântica desses gêmeos com ontologias que descrevem componentes, propriedades e estados abre caminho para simulações de desempenho (energia, conforto, vibração) e estratégias de

otimização contínua, aproximando a cobertura de um sistema ciberfísico que aprende com sua própria operação.

A seleção de materiais merece atenção particular. Além de aços com alto teor de reciclado, cresce o interesse por ligas recicláveis e por híbridos (aço-madeira, aço-compósitos) em elementos secundários, combinando rigidez específica e melhor comportamento ambiental (Ashby, 2012). No entanto, Crawford (2011) alerta que a comparação entre alternativas deve considerar contexto regional, matriz energética e logística; materiais muito leves podem perder vantagem se exigirem longos percursos ou proteção especial no transporte. Em paralelo, Ding (2008) evidencia que ferramentas de avaliação ambiental de edifícios quando alinhadas a uma ACV robusta são importantes para transformar metas de sustentabilidade em critérios verificáveis de projeto, evitando o risco de “*greenwashing*”.

Do ponto de vista de integração energética, coberturas espaciais oferecem superfícies e orientações favoráveis para geração fotovoltaica e captação de água. Kibert (2016) observa que soluções de BIPV (*building-integrated photovoltaics*) podem ser incorporadas a painéis da malha, desde que o projeto elétrico, o peso adicional e os esforços de sucção por vento sejam considerados desde a fase conceitual. Cabeza *et al.* (2014) enfatizam que ganhos reais dependem do acoplamento sistêmico entre forma, sombreamento, ventilação e controle, de modo que a produção de energia não comprometa o conforto higrotérmico.

Dessa forma, é importante reconhecer *trade-offs* e limites. Robinson-Gayle *et al.* (2001) registram que materiais leves e translúcidos, embora vantajosos no balanço estrutural e luminoso, requerem detalhamento cuidadoso para desempenho ao fogo, resistência a perfurações e durabilidade de selagens; já Loonen *et al.* (2013) lembram que sistemas responsivos ampliam a complexidade de operação e exigem estratégias de controle robustas para evitar consumo parasita. Do lado processual, Gramazio e Kohler (2008) ressaltam que a promessa da fabricação digital

só se cumpre com interoperabilidade de dados e metrologia rigorosa, sob pena de deslocar desperdícios do canteiro para a fábrica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho, desenvolvido como revisão bibliográfica, cumpriu o objetivo geral ao realizar uma análise crítica das potencialidades e dos desafios associados à execução de coberturas espaciais, contemplando viabilidade técnica, métodos construtivos, comportamento estrutural, sustentabilidade e custos. Também foram atendidos os objetivos específicos: identificaram-se os principais tipos e aplicações com ênfase em treliças espaciais, domos geodésicos e *grid shells* discutiram-se benefícios estruturais, arquitetônicos e ambientais, mapearam-se os principais pontos críticos nas fases de projeto e execução e, por fim, analisou-se o impacto dessas soluções no cronograma físico e financeiro das obras.

Os resultados indicam que as coberturas espaciais conciliam alto desempenho mecânico com leveza e modularidade, permitindo vencer grandes vãos com redução de peso próprio, racionalização de materiais e maior liberdade formal. Do ponto de vista da engenharia, destacam-se a redundância de caminhos de carga, a boa relação rigidez–massa e a compatibilidade com processos de pré-fabricação e montagem seriada. No campo arquitetônico, evidenciou-se a capacidade de criar espaços amplos e desobstruídos, com potencial para integrar iluminação e ventilação naturais e, quando pertinente, soluções de eficiência energética e manejo ambiental. Em termos de sustentabilidade, verificou-se que a lógica modular e desmontável favorece estratégias de reuso e reciclagem, ao mesmo tempo em que a leveza estrutural pode reduzir impactos incorporados e cargas nas fundações. No plano econômico e de prazos, observou-se que o investimento inicial tende a ser compensado por ganhos de produtividade, previsibilidade de montagem e menor necessidade de manutenções quando há planejamento integrado e controle rigoroso de qualidade.

A análise dos desafios permite afirmar que o desempenho superior dessas estruturas depende de decisões coerentes desde a concepção geométrica até o *as-built*. Entre os pontos sensíveis, sobressaem: o controle geométrico e das tolerâncias, a definição e a execução das ligações, a coordenação entre projeto, fabricação e logística, as sequências de montagem e as rotinas de inspeção e comissionamento. Em sistemas membranares e de cabos, a definição de estados de pretensão e a ordem de tensionamento são decisivas para a forma e a estabilidade; em treliças e *grid shells*, a estratégia de fechamento de malhas e o desempenho dos nós condicionam a rigidez global e os modos de instabilidade. Tais aspectos têm reflexos diretos no cronograma e no custo: interferências não previstas e retrabalhos tendem a ampliar prazos e despesas, ao passo que a padronização de componentes, a rastreabilidade de materiais e a metrologia de campo reduzem riscos e variabilidades.

Dessa forma, as coberturas espaciais se consolidam como soluções de alto valor agregado quando o processo é tratado de modo sistêmico, com integração entre arquitetura, estruturas, fabricação, montagem e operação. A articulação entre forma e desempenho, aliada à industrialização e a estratégias de sustentabilidade, permite alcançar resultados tecnicamente robustos, esteticamente expressivos e economicamente viáveis em diferentes escalas e tipologias.

Recomenda-se que investigações futuras realizem estudos comparativos com dados primários de obras reais, contemplando métricas de custo, prazo e desempenho em serviço; desenvolvam análises de ciclo de vida e de carbono incorporado específicas para diferentes materiais e cadeias de suprimento; explorem métodos de otimização formal e estrutural integrados a critérios ambientais e de manutenção; avaliem o uso de monitoramento em tempo real para calibração de modelos e gestão preditiva; e consolidem diretrizes de projeto para desmontagem e reuso, a fim de ampliar a circularidade de componentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ADRIAENSSENS, Sigrid et al. (Ed.). **Shell structures for architecture: form finding and optimization**. Routledge, 2014.

AISC. **Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges** (AISC 303). Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.

ASHBY, Michael F. **Materials and the environment: eco-informed material choice**. Elsevier, 2012.

BARTH, Fernando; VEFAGO, Luiz Henrique; VASCONCELOS, Cláudia. Compacidade dos espaços arquitetônicos. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/246220>. Acesso em: 01 agost. 2025.

BOJE, Calin et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in construction**, v. 114, p. 103179, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179> . Acesso em: 01 agost. 2025.

BRIBIÁN, Ignacio Zabalza; CAPILLA, Antonio Valero; USÓN, Alfonso Aranda. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and environment**, v. 46, n. 5, p. 1133-1140, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>. Acesso em: 01 agost. 2025.

CABEZA, Luisa F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 29, p. 394-416, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>. Acesso em: 01 agost. 2025.

CHILTON, John. **Space grid structures**. Routledge, 2007.

CRAWFORD, Robert. **Life cycle assessment in the built environment**. Routledge, 2011.

DING, Grace KC. Sustainable construction—The role of environmental assessment tools. **Journal of environmental management**, v. 86, n. 3, p. 451-464, 2008.

DOUTHE, Cyril; BAVEREL, Olivier; CARON, J.-F. Form-finding of a grid shell in composite materials. **Journal of the International Association for Shell and Spatial structures**, v. 47, n. 1, p. 53-62, 2006. Disponível em: www.ingentaconnect.com/content/iass/jiass/2006/00000047/00000001/art00005. Acesso em: 01 agost. 2025.

ELLWANGER, Ronald José. A construção do conhecimento em análise de estruturas de edifícios. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 24, n. 1, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.5335/ree.v24i1.206>. Acesso em: 01 agost. 2025.

EN 1090-2. **Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures**. Brussels: CEN, 2018.

FARRAR, Charles R.; WORDEN, Keith. **Structural health monitoring: a machine learning perspective**. John Wiley & Sons, 2012.

FORSTER, Brian; CHILTON, John. **Introduction [European design guide for tensile surface structures]**. University of Lincoln, 2004.

FRANCO, Tayrine Turonis Pereira. Dimensionamento da cobertura de um ginásio em estrutura espacial: um estudo de caso. 2018. Disponível em: <http://repositorio.anhanguera.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/57>. Acesso em: 01 agost. 2025.

FULLER, Richard Buckminster. Building Construction. Patent N 2682235. 1954.

GANTES, Charis J. Deployable structures: analysis and design. **(No Title)**, 2001.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>. Acesso em: 01 agost. 2025.

GIBB, Alistair GF. **Off-site fabrication: prefabrication, pre-assembly and modularisation**. John Wiley & Sons, 1999.

GORGOLEWSKI, Mark. Designing with reused building components: some challenges. **Building research & information**, v. 36, n. 2, p. 175-188, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>. Acesso em: 01 agost. 2025.

GRAFF, Samantha. Análise comparativa de sistemas estruturais compostos por vigas e lajes maciças ou nervuradas em edifícios. 2015.

GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Digital materiality in architecture. **(No Title)**, 2008.

HAPPOLD, Edmund; LIDDELL, W. Ian. Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau. **The structural engineer**, v. 53, n. 3, p. 99-135, 1975.

KIBERT, Charles J. **Sustainable construction: green building design and delivery**.

KRIPKA, Moacir. **Análise estrutural para engenharia civil e arquitetura: estruturas isostáticas**. Oficina de Textos, 2021.

KOLAREVIC, Branko. Architecture in the digital age. **Design and Manufacturing. Nueva York-Londres: Spon Press-Taylor & Francis Group**, 2003.

LOONEN, Roel CGM et al. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 25, p. 483-493, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>. Acesso em: 01 agost. 2025.

MAGALHÃES, João Ricardo Maia de. **Sobre o projeto e a construção de estruturas metálicas espaciais**. 1996. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2018.tde-29052018-104659>. Acesso em: 01 agost. 2025.

MAKOWSKI, Zygmunt Stanislaw. Analysis, design and construction of double-layer grids. (No Title), 1981.

MARTHA, Luiz. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Elsevier Brasil, 2010.

MARTINI, Renata Jardim. Estrutura de cobertura metálica em malha treliçada espacial. 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-APPGGU>. Acesso em: 01 agost. 2025.

MOTRO, René. Tensegrity: from art to structural engineering. In: **2012 IASS-APCS Symposium**. 2012. p. 14 p. Disponível em: hal.science/hal-00857410/. Acesso em: 01 agost. 2025.

NOVAES, Fernanda Oliveira de et al. Arquitetura modular: conceitos, práticas e benefícios. 2024. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/29191>. Acesso em: 01 agost. 2025.

OTTO, Frei (Ed.). **Tensile Structures: Design, Structure, and Calculation of Building of Cables, Nets and Membranes**. Mit Press, 1966.

ROBINSON-GAYLE, Syreeta et al. ETFE foil cushions in roofs and atria. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 7, p. 323-327, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00013-7). Acesso em: 01 agost. 2025.

SACKS, Rafael et al. **BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers**. John Wiley & Sons, 2018.

SEIDEL, Michael. **Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction**. John Wiley & Sons, 2009.

SILVA, Helcio Mário Coelho da; SOUZA, Milleno Ramos de. **Análise de viabilidade da substituição dos perfis tubulares circulares por perfis em cantoneira simples na cobertura em estrutura espacial da rodoviária de Breu Branco/PA. 2014**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

SILVA, Welington V. et al. Experimental analysis of space trusses using spacers of concrete with steel fiber and sisal fiber. **Materials**, v. 13, n. 10, p. 2305, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13102305>. Acesso em: 01 agost. 2025.

SOUZA, Arnaldo Nascimento de. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Alex Sander Clemente de. **Contribuição ao estudo das estruturas metálicas espaciais**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Alex Sander Clemente de. **Análise teórica e experimental de treliças espaciais**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em:

<https://doi.org/10.11606/T.18.2003.tde-11102003-164954>. Acesso em: 01 agost. 2025.

VAN MELE, Tom et al. Geometry-based understanding of structures. **Journal of the international association for shell and spatial structures**, v. 53, n. 4, p. 285-295, 2012. Disponível em: www.ingentaconnect.com/content/iass/jiass/2012/00000053/00000004/art00011. Acesso em: 01 agost. 2025.

WEISS, Richard M. The structure of spherical buildings. In: **The Structure of Spherical Buildings**. Princeton University Press, 2020. Disponível em: www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9780691216041/html. Acesso em: 01 agost. 2025.

WOLF, Catherine; POMPONI, Francesco; MONCASTER, Alice. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. **Energy and buildings**, v. 140, p. 68-80, 2017.

XAVIER, Emerson MA; MEYER, Wladimir S.; LUNARDI, Omar A. Aplicações, tendências e desafios em infraestruturas de dados espaciais. **Bahia Análise & Dados**, v. 25, n. 4, p. 699-714, 2015.

[← Post anterior](#)

[Post seguinte →](#)

RevistaFT

A **RevistaFT** têm 30 anos. É uma
Revista Científica Eletrônica
Interdisciplinar Indexada de Alto

Contato

Queremos te
ouvir.
WhatsApp: (21)

Conselho
Editorial

Editores
Fundadores:

Impacto e Qualis/DOI.

Periodicidade mensal e de acesso livre. Leia gratuitamente todos os artigos e publique o seu também [clikando aqui](#),



99451-7530

WhatsApp: (21)

99217-2623

WhatsApp SP:

(11) 98597-3405

e-Mail:

contato@revistaf
t.com.br

ISSN: 1678-0817

CNPJ:

48.728.404/0001-
22

Fator de

impacto FI=

6.684 (segundo
maior do Brasil

Dr. Oston de
Lacerda Mendes.
Dr. João Marcelo
Gigliotti.

Editor

Científico:

Dr. Oston de
Lacerda Mendes

Jornalista

Responsável:

Marcos Antônio
Alves MTB

6036DRT-MG

Orientadoras:

Dra. Hevellyn
Andrade
Monteiro
Dra. Chimene
Kuhn Nobre

Revisores:

Lista atualizada
periodicamente
em

revistaft.com.br/expanded Venha
fazer parte de
nosso time de
revisores
também!

Copyright © Revista ft Ltda. 1996 -
2026

Rua José Linhares, 134 - Leblon | Rio
de Janeiro-RJ | Brasil