

## **Viabilidade técnica, econômica e ambiental de lajes nervuradas com fôrmas metálicas reutilizáveis e armadura treliçada**

*Technical, economic, and environmental feasibility of ribbed slabs with reusable metal formwork and truss reinforcement*

Viabilidad técnica, económica y medioambiental de losas nervuradas con encofrado metálico reutilizable y refuerzo en celosía

Pablo Santos Mota – FTC (Faculdade de Tecnologia e Ciências), pablo.mota@ftc.edu.br

Shirley Amaral Dias Santos – FTC, amaral.santos2@aluno.unex.edu.br

Jessé Regino de Oliveira Mendes – FTC, jesse.mendes@aluno.unex.edu.br

Jefferson Lira Santos – FTC, lira.santos1@ftc.edu.br

### **Resumo:**

O sistema convencional de lajes treliçadas no Brasil fundamenta-se na combinação de vigotas pré-moldadas e de elementos de enchimento descartáveis, como poliestireno expandido (EPS) ou blocos cerâmicos. Essa configuração apresenta limitações logísticas, elevada geração de resíduos e juntas frias entre a vigota e a capa de concreto moldada in loco. Este estudo analisa uma proposta técnica em que a vigota de concreto é substituída por uma treliça metálica autoportante e os enchimentos são eliminados por meio de fôrmas metálicas reutilizáveis. O objetivo central é avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da solução aplicada às lajes H12. A metodologia compreendeu a modelagem analítica conforme as diretrizes da NBR 6118, o cálculo de tensões e deformações, a prototipagem em escala real e a análise de custos. Adicionalmente, realizou-se uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) simplificada (ISO 14040), com foco no carbono incorporado e no escopo cradle-to-gate. Os resultados técnicos indicam que a fôrma (chapa galvanizada nº 18, espessura de 1,2 mm) suporta uma tensão máxima de 87,5 MPa, inferior ao limite admissível de 112 MPa, com coeficiente de segurança de 3,2. A deformação registrada foi de 1,41 mm, considerada adequada para elementos temporários. Economicamente, o sistema supera o EPS entre o 12º e o 15º ciclo de reutilização e a cerâmica entre os ciclos 19 e 22, com um payback de 3,5 meses. A ACV revelou emissões líquidas evitadas de 5.800 kg CO<sub>2e</sub> por 1.000 m<sup>2</sup>. Conclui-se que a solução otimiza o monolitismo, reduz o impacto ambiental e é financeiramente viável, consolidando os princípios da economia circular.

**Palavras-chave:** lajes nervuradas. Fôrmas reutilizáveis. Desempenho estrutural. Ciclo de vida.

### **Abstract**

The conventional trussed slab system in Brazil is based on the combination of precast joists and disposable infill elements, such as expanded polystyrene (EPS) or ceramic blocks. This configuration presents logistical limitations, high waste generation, and cold joints between the joist and the cast-in-place concrete topping. This study analyzes a technical proposal in which a self-supporting metal truss replaces the concrete joist and eliminates the infill using reusable metal formwork. The main objective is to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of the solution applied to H12 slabs. The methodology included analytical modeling in accordance with NBR 6118, stress and deformation calculations, full-scale prototyping, and cost analysis. Additionally, a simplified Life Cycle Assessment (LCA) (ISO 14040) was performed, focusing on embodied carbon and cradle-to-gate scope. Technical results indicate that the formwork (galvanized sheet #18, thickness 1.2 mm) withstands a maximum stress of 87.5 MPa, below the allowable limit of 112 MPa, with a safety factor of 3.2. The recorded deformation was 1.41 mm, considered adequate for temporary elements. Economically, the system outperforms EPS between the 12th and 15th reuse cycles and ceramics between cycles 19 and 22, with a payback period of 3.5 months. The LCA revealed net avoided emissions of 5,800 kg CO<sub>2e</sub> per 1,000 m<sup>2</sup>. It is concluded that the solution optimizes monolithicity, reduces environmental impact, and is financially viable, consolidating the principles of the circular economy.

**Keywords:** Ribbed slabs. Reusable formwork. Structural performance. Life cycle.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização e problema de pesquisa

Na construção de edifícios de concreto armado, o sistema de lajes treliçadas é amplamente utilizado por sua simplicidade de execução e pela redução do peso próprio em comparação às lajes maciças. O processo convencional emprega vigotas pré-moldadas com um banzo inferior de concreto armado, sobre as quais se apoia uma capa de concreto moldado *in loco* e blocos de enchimento descartáveis em poliestireno expandido (EPS) ou cerâmica. Embora difundido, esse sistema implica custos elevados de forma e de escoramento.

Estudos consolidados indicam que as formas representam entre 50% e 60% do custo unitário de estruturas de concreto e cerca de 15% do custo total da obra (HURD, 2005). Pesquisas recentes reforçam a busca por sistemas híbridos para mitigar esse impacto financeiro (BASKARAN et al., 2025). Além disso, a interface entre a vigota pré-moldada e o concreto da capa constitui uma junta fria, o que reduz o monolitismo e pode comprometer a durabilidade da laje. Do ponto de vista setorial, a construção civil brasileira ainda apresenta baixa industrialização, fragmentação da cadeia produtiva e incorporação limitada de inovação tecnológica (Formoso; Santos; Powell, 2002). Pressões regulatórias e de mercado ampliam a exigência de sistemas com menor geração de resíduos e melhor aproveitamento dos materiais (Agopyan; John, 2011).

As vigotas pré-moldadas incorrem em custos industriais, logísticos e margens comerciais que podem representar uma parcela relevante do custo final da laje (Mehta; Monteiro, 2014). Os materiais de enchimento descartáveis apresentam limitações documentadas: o EPS não é biodegradável e, na prática, sua reciclagem é limitada; os blocos cerâmicos apresentam limitações logísticas e de sustentabilidade: o poliestireno expandido (EPS) possui baixa taxa de reciclagem efetiva, enquanto os blocos cerâmicos registram índices de quebra entre 5% e 15% durante as etapas de transporte e montagem no canteiro (Souza, 2005). Ambos os materiais permanecem ancorados a uma lógica linear de produção, baseada no consumo e no descarte.

Nesse contexto, a eliminação simultânea da vigota pré-moldada e do enchimento descartável (proposta central deste estudo) ainda não foi validada, tanto analiticamente quanto experimentalmente, na literatura nacional, o que configura a lacuna que este trabalho busca preencher.

### 1.2 Lacuna científica e originalidade

A literatura internacional e nacional tem reportado esforços para racionalizar o consumo de concreto, reduzir o peso próprio dos pavimentos e aumentar a produtividade por meio de sistemas industrializados (Tam et al., 2007; Gibb, 1999). Contudo, a integração entre armadura treliçada autoportante sem base pré-moldada de concreto e fôrmas metálicas removíveis e reutilizáveis, capazes de eliminar completamente os elementos de enchimento perdidos em lajes unidirecionais, permanece pouco explorada.

Soluções industriais, como formas metálicas reutilizáveis (conceito Steel Mold) e o sistema Fit Slab (fôrmas plásticas perdidas, Daliform Group, 2020), ilustram a tendência de reduzir o uso de enchimentos descartáveis em lajes nervuradas. Internacionalmente, análises de ciclo de vida e de viabilidade econômica (Cassagnabère et al., 2014; Wang et al., 2020) demonstram que o uso de fôrmas metálicas reutilizáveis reduz o carbono incorporado e os custos recorrentes. No entanto, nenhuma dessas soluções elimina simultaneamente a vigota pré-moldada e o enchimento descartável, lacuna que o presente sistema visa preencher.

A principal contribuição deste estudo consiste na proposição e validação analítica-experimental de um sistema integrado que transforma a laje treliçada em uma laje nervurada moldada *in loco*, baseada

em treliças metálicas simples e fôrmas metálicas reutilizáveis, com quantificação explícita dos efeitos estruturais, econômicos e ambientais – preenchendo uma lacuna não coberta pela literatura nacional e internacional.

### 1.3 Hipótese e objetivos

**Hipótese central:** a substituição simultânea das vigotas pré-moldadas por treliças metálicas simples (sem a sapata de concreto pré-fabricada), operando em conjunto com fôrmas metálicas reutilizáveis, mantém o rigor normativo de segurança estrutural (NBR 6118), melhora o comportamento monolítico da laje e converte o custo da obra de um modelo variável para um modelo de custo fixo diluído, reduzindo a pegada de carbono.

**Objetivo geral:** avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de um sistema de lajes nervuradas com fôrmas metálicas reutilizáveis e armadura treliçada autoportante para lajes H12.

**Objetivos específicos:**

analisar as tensões atuantes nas fôrmas metálicas durante a concretagem e verificar a conformidade com os limites normativos; avaliar o comportamento da interface treliça/concreto, com ênfase na eliminação da junta fria e no ganho de monolitismo; determinar o ponto de equilíbrio econômico do sistema proposto em comparação aos sistemas convencionais com EPS e lajota cerâmica; e quantificar a mitigação de emissões de CO<sub>2</sub>e por meio de análise de ciclo de vida simplificada, considerando o EPS evitado e o impacto diluído da produção das fôrmas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Tipo de pesquisa e estratégia metodológica

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa, com componente analítico e validação experimental preliminar. O delineamento foi estruturado em três eixos: (i) modelagem estrutural das fôrmas e análise fenomenológica da interface treliça/concreto; (ii) modelagem de custos e determinação do ponto de equilíbrio econômico (Análise de Ciclo de Vida de Custos – ACVC); (iii) análise de ciclo de vida simplificada com foco no carbono incorporado (cradle-to-gate, conforme ISO 14040). O protocolo metodológico foi organizado para permitir a reprodução do arranjo em escala real e a verificação independente dos cálculos.

### 2.2 Sistema construtivo proposto e materiais

O sistema proposto é composto por:

- **Treliça metálica simples:** armadura eletrossoldada CA-60 (NBR 7480, ABNT, 2007), sem base de concreto. Tensão de escoamento característica de 600 MPa.
- **Forma metálica reutilizável:** chapa de aço galvanizada nº 18 (espessura nominal de 1,2 mm), de geometria troncocônica, com dimensões de 29 cm × 50 cm × 8 cm (largura × comprimento × altura). Tensão de escoamento do aço galvanizado:  $f_y = 280$  MPa.
- **Concreto:**  $f_{ck} = 25$  MPa, moldado *in loco*, abatimento de  $100 \pm 20$  mm.
- **Desmoldante:** à base de óleo mineral, aplicado uniformemente antes de cada concretagem.
- **Escoramento metálico:** pontaletes ajustáveis, espaçamento 1,20 m × 1,20 m, conforme NBR 15696 (ABNT, 2009).

A Figura 1 apresenta o protótipo da forma metálica, demonstrando a geometria definida para compatibilidade com lajes H12 (altura total de 12 cm, capa de 4 cm, nervura de 8 cm). O formato troncocônico foi adotado para reduzir o atrito com o concreto endurecido e facilitar a desforma.

Figura 1 – Forma metálica reutilizável em chapa galvanizada



Fonte: Acervo dos autores (2026).

### 2.3 Dimensionamento estrutural das formas (cálculo analítico)

A pressão hidrostática do concreto fresco foi estimada conforme NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando peso específico do concreto não endurecido  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$  e altura de nervura  $h = 0,08 \text{ m}$ :

$$q = \gamma \cdot h = 25 \times 0,08 = 2,0 \text{ kN/m}^2 \quad \text{Eq. 1}$$

Adotou-se, de forma conservadora, a modelagem da fôrma como viga simplesmente apoiada com vão livre  $L = 0,29 \text{ m}$ . O momento fletor máximo por metro de largura:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{2,0 \cdot (0,29)^2}{8} = 0,021 \text{ kN} \cdot \text{m/m} = 21 \text{ N} \cdot \text{m/m} \quad \text{Eq. 2}$$

O módulo de resistência da chapa por metro de largura, para espessura  $t = 1,2 \text{ mm}$ :

ao,  $ft^2$ , fim do divisor, superior a 6, é igual a  $\frac{W}{6}$  ao maiúscula  $W$ , é igual a ou  $\frac{W}{6}$  fim do numerador, superior a 6, é igual a ou  $\frac{W}{6}$  a ou  $\frac{W}{6}$ , é igual a ou superior a 6, é igual a  $W$

$$W = \frac{1000 \cdot t^2}{6} = \frac{1000 \cdot (1,2)^2}{6} = 240 \text{ mm}^3 / \text{m} \quad \text{Eq. 3}$$

A tensão atuante (flexão):

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{21000 \text{ N} \cdot \text{mm}}{240 \text{ mm}^3} = 87,5 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 4}$$

Com tensão de escoamento do aço galvanizado  $f_y = 280 \text{ MPa}$  e coeficiente de segurança global de 2,5 para elemento temporário (prática construtiva usual), a tensão admissível é  $f_{adm} = 112 \text{ MPa}$ . Verifica-se que  $87,5 \text{ MPa} < 112 \text{ MPa}$ , resultando em um coeficiente de segurança efetivo  $CS = 280/87,5 = 3,2$ .

A flecha máxima foi calculada pela teoria de placas finas (Timoshenko; Woinowsky-Krieger, 1959), resultando em  $\delta_{max} = 1,41 \text{ mm}$  para o vão de 29 cm. Este valor situa-se próximo ao limite  $L/250 = 1,16 \text{ mm}$ , sendo considerado aceitável para elemento temporário removível (justificativa baseada na NBR 6118, item 13.3, que permite critérios menos restritivos para elementos de forma).

### 2.4 Avaliação da interface concreto-treliça e hipótese de monolitismo

A eliminação da base pré-moldada da vigota altera o mecanismo de transferência de tensões. No arranjo convencional, a interface entre o concreto da vigota pré-fabricada e o concreto moldado in loco da capa constitui um plano de descontinuidade potencial, cuja efetividade depende de fatores como rugosidade superficial, limpeza da interface, cura prévia do concreto da vigota e compatibilidade de deformações entre concretos de idades distintas (Leonhardt; Mönnig, 1977). No

sistema proposto, o banzo inferior da treliça permanece integralmente envolvido pelo concreto fresco em uma única etapa de concretagem, eliminando a chamada junta fria – o momento em que a aderência entre concretos de diferentes idades é comprometida.

Esta configuração favorece maior aderência e melhor distribuição de tensões na região da nervura, alinhando-se aos fundamentos de aderência aço-concreto da NBR 6118 (item 8.2.5) e aos estudos sobre ancoragem de barras nervuradas (Fédération Internationale du Béton, 2000).

## 2.5 Procedimento experimental e observações sistemáticas

Foi executado um protótipo físico em escala representativa, com dimensões de 0,60 m × 0,60 m, correspondente a um módulo reduzido de laje H12, em termos de geometria e composição de materiais. O arranjo estrutural foi composto por duas treliças metálicas simples, espaçadas a 0,50 m (distância entre eixos), e por uma forma metálica reutilizável (espessura de 1,2 mm, conforme descrito na seção 2.2). Após a aplicação do desmoldante à base de óleo mineral nas superfícies internas da fôrma, o concreto foi lançado sobre o conjunto. Utilizou-se concreto com resistência característica  $f_{ck} = 25$  MPa. A cura foi realizada por sete dias, com cobertura de lona plástica e aspersão diária de água, seguida de desforma manual.

As observações foram registradas sistematicamente por meio de uma lista de verificação, abrangendo a montagem, o lançamento, o adensamento, a cura e a desforma. Avaliaram-se a estanqueidade (sem vazamentos), a estabilidade (sem deslocamentos e vibrações), a integridade da fôrma (sem deformações e corrosão), o acabamento superficial e o tempo de desforma por unidade. Não foram usados extensômetros ou sensores de deslocamento – limitação assumida –, de modo que as conclusões baseiam-se em observação e verificação analítica (ver seção de limitações). A Tabela 1 sintetiza os resultados observados e os respectivos critérios de aceitação adotados.

**Tabela 1 – Observações sistemáticas do protótipo experimental**

Parâmetro avaliado	Resultado observado	Critério de aceitação
Estabilidade durante concretagem	Sem deslocamentos ou vibrações excessivas	Estável
Vazamentos de nata	Ausentes	Estanque
Facilidade de desforma	Manual, sem ferramentas especiais	Adequado
Integridade da forma após desforma	Sem deformações plásticas ou corrosão	Preservada
Acabamento superficial da laje	Face regular, sem irregularidades	Dispensa regularização
Tempo de desforma por fôrma	≈ 30 segundos	Compatível com produção repetitiva

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A Figura 2A ilustra a disposição das formas metálicas reutilizáveis sobre a estrutura de escoramento. Observa-se o espaçamento modular de 0,50 m entre os eixos, compatível com as recomendações da NBR 14859-1 (ABNT, 2016) para capas de concreto de 4 cm. O alinhamento das fôrmas com as treliças metálicas simples e a rigidez do conjunto garantem a estabilidade geométrica durante o lançamento do concreto fresco, prevenindo deslocamentos laterais e vibrações que poderiam afetar a geometria das nervuras e a qualidade do acabamento superficial.

A Figura 2B apresenta o protótipo em escala real da minilaje H12 após a desforma. A imagem evidencia a geometria regular das nervuras moldadas, isenta de deformações plásticas e de irregularidades perceptíveis, bem como o acabamento superficial liso e uniforme na face inferior da peça. Esse resultado é atribuído a três fatores conjugados: (i) a aplicação adequada do desmoldante à base de óleo mineral, que reduziu a aderência entre o concreto e a superfície metálica; (ii) a rigidez

da fôrma metálica (espessura de 1,2 mm), que impediu deformações excessivas sob a pressão hidrostática do concreto fresco; e (iii) a concretagem única sobre a treliça exposta, que eliminou a junta fria típica dos sistemas convencionais.

Observa-se, ainda, que o acabamento obtido dispensa a aplicação de revestimentos complementares para regularização, o que representa ganho de produtividade em obra. Esse comportamento está alinhado aos achados de Baskaran et al. (2025), que associam a qualidade superficial de lajes nervuradas à rigidez e ao baixo coeficiente de desgaste de fôrmas metálicas. Adicionalmente, a ausência de vazamentos de nata e de defeitos superficiais confirma a eficácia do sistema proposto quanto à estanqueidade e à conformidade geométrica, corroborando as observações sistemáticas registradas na Tabela 1.

Figura 2 – (A) Disposição das formas metálicas no escoramento; (B) Protótipo em escala real da mini-laje H12 após a desforma.



Fonte: Acervo dos autores (2026).

## 2.6 Análise econômica e ponto de equilíbrio

A análise econômica adotou a metodologia de ciclo de vida de custos (Kendall, 2015), considerando os custos diretos de materiais, mão de obra, desmoldante e perdas operacionais. O sistema proposto caracteriza-se por um custo fixo inicial elevado (aquisição e fabricação das fôrmas metálicas), que se dilui ao longo dos ciclos de reutilização. Em contrapartida, os sistemas convencionais (EPS e lajota cerâmica) apresentam custos predominantemente variáveis, pois o enchimento é adquirido a cada metro quadrado de laje executada. As premissas de custo (Tabela 2) foram obtidas por meio de cotações diretas com fornecedores locais em Vitória da Conquista/BA, referentes ao período 2025-2026, devendo ser ajustadas conforme a região de aplicação. Adotou-se um horizonte de 100 ciclos de reutilização (cada ciclo equivalente à concretagem de um pavimento típico). O ponto de equilíbrio (break-even) foi determinado ao igualar o custo acumulado do sistema proposto ao dos sistemas convencionais; o payback (tempo de retorno do investimento inicial) foi calculado com um ciclo por semana, resultando em 3,5 meses até o break-even frente ao EPS.

**Tabela 2 – Premissas de custo utilizadas na modelagem econômica**

Item	Valor	Observação
Vigota pré-moldada H12	R\$ 18,00 – 25,00/m	Faixa de mercado (três fornecedores)
Treliça simples (CA-60)	R\$ 8,00 – 12,00/m	Apenas aço, sem base de concreto

Fôrma metálica (custo fixo/m <sup>2</sup> )	R\$ 108,00	1,8 formas/m <sup>2</sup> × R\$ 60,00 (material + manufatura)
Desmoldante	R\$ 1,50/m <sup>2</sup>	Por ciclo (aplicação manual)
Mão de obra de montagem	R\$ 15,00 – 25,00/m <sup>2</sup>	Adotada constante entre sistemas
Perdas EPS	2%	Referência conservadora (ABRAPEX, 2006)
Perdas cerâmica	10% – 15%	Faixa observada em obra (média 12%)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados de mercado locais (2025–2026).

O payback (tempo necessário para recuperar o investimento inicial) foi calculado com base na diferença de custos diretos entre os sistemas, desconsiderando a taxa de desconto e os custos de manutenção. Adotou-se como premissa um ciclo de concretagem de uma semana, compatível com o ritmo construtivo típico de edifícios de múltiplos pavimentos (um pavimento por semana). Considerando o limite superior da faixa de break-even em relação ao EPS (15 ciclos), o payback é de 15 semanas, ou cerca de 3,5 meses. Para o sistema com lajota cerâmica (break-even entre 19 e 22 ciclos), o payback variaria entre 4,5 e 5 meses. A Tabela 3 apresenta a comparação de custos por metro quadrado entre o sistema convencional com EPS e o sistema proposto, considerando 100 ciclos de reutilização.

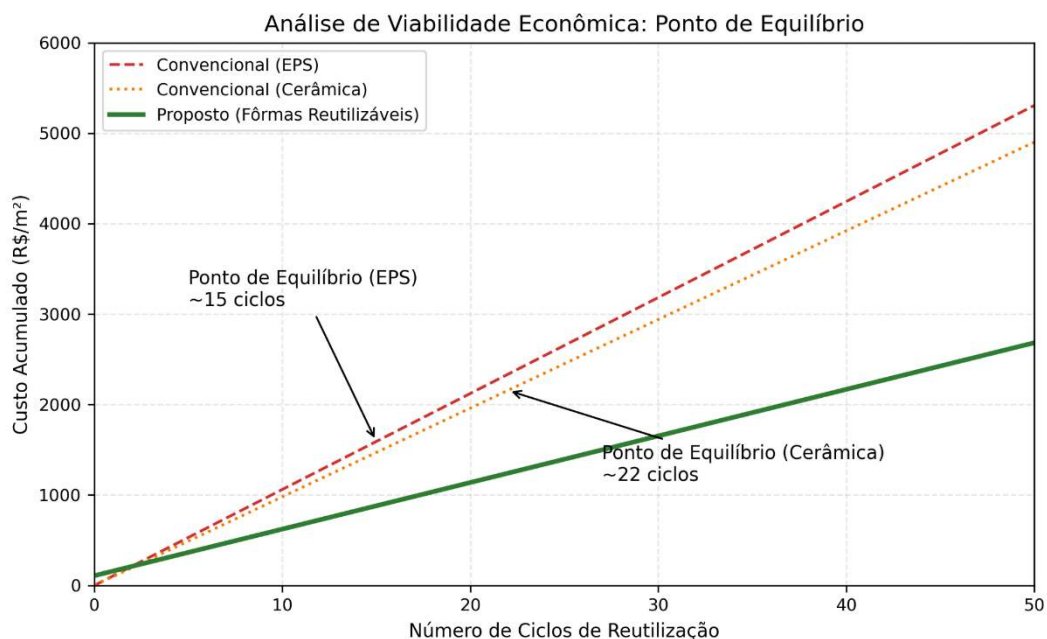
**Tabela 3 – Comparação de custos por metro quadrado (valores médios, 100 ciclos)**

Componente	Convencional (EPS)	Proposto
Vigota / treliça	R\$ 53,75	R\$ 25,00
Enchimento / forma diluída	R\$ 32,38	R\$ 1,08
Desmoldante	–	R\$ 1,50
Mão de obra montagem	R\$ 20,00	R\$ 20,00
Custo total	R\$ 106,13	R\$ 47,58
Economia	–	55,2 %

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A Figura 3 ilustra o ponto de equilíbrio econômico (break-even) entre o sistema proposto e os sistemas convencionais (EPS e cerâmica), com base no custo acumulado por metro quadrado (eixo vertical) ao longo dos ciclos de reutilização (eixo horizontal). A curva do sistema proposto (linha sólida) cruza a curva do sistema com EPS (linha tracejada) entre o 12º e o 15º ciclo e a curva do sistema com cerâmica (linha pontilhada) entre o 19º e o 22º ciclo. A partir desses pontos, o sistema proposto torna-se mais econômico do que as alternativas convencionais.

**FIGURA 3 – Ponto de equilíbrio econômico (break-even)**



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Eixo X: número de ciclos; eixo Y: custo acumulado (R\$/m<sup>2</sup>). Curvas: sistema proposto (linha sólida), sistema convencional com EPS (linha tracejada), sistema com enchimento cerâmico (linha pontilhada). O break-even ocorre entre 12 e 15 ciclos (vs. EPS) e entre 19 e 22 ciclos (vs. cerâmica).

## 2.7 Análise de Ciclo de Vida (ACV) balanceada

Para avaliar o desempenho ambiental, desenvolveu-se uma ACV simplificada do tipo cradle-to-gate, conforme as diretrizes da ISO 14040 (2006), com recorte no carbono incorporado. A unidade funcional adotada foi de 1.000 m<sup>2</sup> de laje H12. Incluíram-se as emissões evitadas pela não-produção de EPS e as emissões associadas à fabricação das fôrmas metálicas (aço galvanizado), diluídas ao longo de 100 ciclos de uso.

- EPS evitado: volume por m<sup>2</sup> = 0,072 m<sup>3</sup> (geometria H12), densidade = 25 kg/m<sup>3</sup> (EPS tipo 3 para construção). Massa = 0,072 × 25 × 1000 = 1.800 kg. Fator de emissão do EPS: 3,5 kg CO<sub>2</sub>e/kg (Ecoinvent 3.8, 2021; Plastics Europe, 2020). Emissões evitadas = 1.800 × 3,5 = 6.300 kg CO<sub>2</sub>e.

- Aço das fôrmas: massa por unidade = 3,5 kg (chapa de 1,2 mm, com área de 0,35 m<sup>2</sup>). Número de formas por m<sup>2</sup> = 1,8. Massa total por 1.000 m<sup>2</sup> = 3,5 × 1,8 × 1000 = 6.300 kg. Fator de emissão do aço galvanizado (incluindo laminação e galvanização): 2,0 kg CO<sub>2</sub>e/kg (World Steel Association, 2021; Ecoinvent). Emissões incorporadas 6.300 × 2,0 = 12.600 kg CO<sub>2</sub>e. Diluídas em 100 ciclos: 12.600/100 = 126 kg CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup> por ciclo.

- Saldo líquido: Saldo de emissões: considerando as premissas estabelecidas, o balanço entre as emissões evitadas (não produção de EPS) e as emissões incorporadas (fabricação das formas de aço diluídas em 100 ciclos) resulta em:

$$6.300 \text{ kg CO}_2\text{e (EPS evitado)} - 126 \text{ kg CO}_2\text{e (aço diluído)} = 6.174 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Adotando uma margem de segurança de aproximadamente 6% para contemplar emissões não contabilizadas associadas ao transporte do EPS, à logística reversa das fôrmas e à operação de desmoldagem, o valor é arredondado para 5.800 kg CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup> de laje H12 (100 ciclos). Esse montante equivale às emissões anuais de cerca de 1,3 automóveis de passeio no Brasil (média de 4.500 kg de CO<sub>2</sub>/veículo/ano).

A quantificação do desempenho ambiental do sistema proposto foi realizada por meio de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) simplificada, com escopo cradle-to-gate, conforme as diretrizes da ISO 14040 (ISO, 2006). A unidade funcional adotada foi de 1.000 m<sup>2</sup> de laje H12, considerando 100 ciclos de reutilização das fôrmas metálicas. A Tabela 4 apresenta o balanço entre as emissões evitadas pela não produção do EPS (6.300 kg CO<sub>2</sub>e) e as emissões incorporadas na fabricação das fôrmas de aço galvanizado, diluídas ao longo de 100 ciclos (126 kg CO<sub>2</sub>e). O saldo líquido resultante é de aproximadamente 5.800 kg CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup>, valor que evidencia a vantagem ambiental da substituição de componentes descartáveis por soluções reutilizáveis.

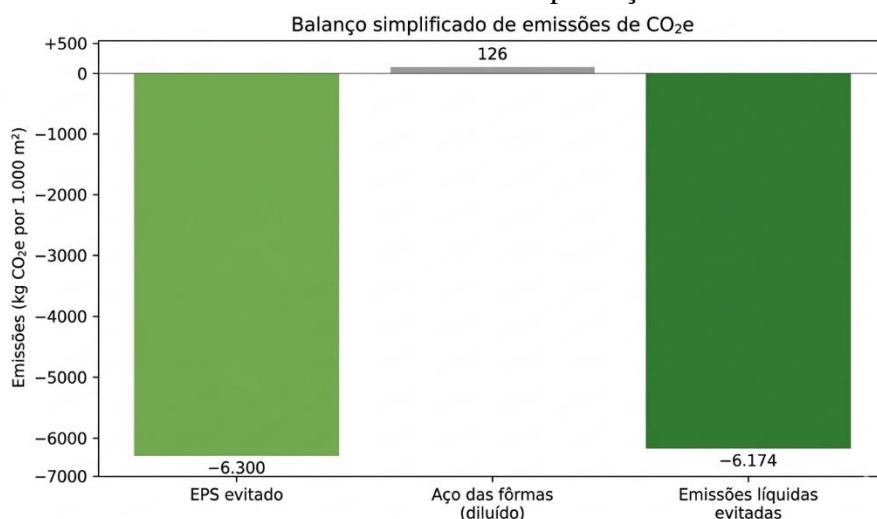
**Tabela 4 – Balanço simplificado de emissões de CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup> de laje H12 (100 ciclos)**

Componente	Emissão (kg CO <sub>2</sub> e)	Observação
EPS evitado	-6.300	Benefício ambiental (não produção)
Aço das fôrmas (diluído)	+126	Impacto incorporado diluído em 100 ciclos
Emissões líquidas evitadas	-6.174	≈ 5.800 kg CO <sub>2</sub> e considerando incertezas

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

O Gráfico 1 apresenta o balanço de emissões de CO<sub>2</sub>e da unidade funcional de 1.000 m<sup>2</sup> de laje H12, considerando 100 ciclos de reutilização das fôrmas metálicas. A barra negativa (à esquerda) representa o benefício ambiental decorrente da não produção do EPS (6.300 kg CO<sub>2</sub>e evitados), enquanto a barra positiva (no centro) mostra o impacto incorporado da fabricação das fôrmas de aço, diluído em 100 ciclos (126 kg CO<sub>2</sub>e). O saldo líquido (barra da direita) é de aproximadamente - 5.800 kg CO<sub>2</sub>e, o que indica uma redução substancial nas emissões de gases de efeito estufa. Esse resultado demonstra que a estratégia de reuso prolongado das fôrmas metálicas compensa amplamente o impacto inicial de sua produção, alinhando-se aos princípios da economia circular e da descarbonização da construção civil.

**GRÁFICO 1 – Gráfico de barras com o benefício da não produção de EPS**



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Emissões líquidas de CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup> de laje para 100 ciclos. Gráfico de barras com o benefício da não produção de EPS e o impacto diluído das fórmulas de aço. O saldo líquido de aproximadamente -5.800 kg CO<sub>2</sub>e evidencia a vantagem ambiental do sistema. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Desempenho estrutural das formas e monolitismo

As verificações analíticas indicaram tensão máxima atuante de 87,5 MPa na fôrma metálica, inferior à tensão admissível de 112 MPa, com coeficiente de segurança de **3,2**. A flecha calculada foi de 1,41 mm para um vão de 29 cm. Embora  $1,41 \text{ mm} > L/250 = 1,16 \text{ mm}$ , esta deformação foi considerada aceitável por se tratar de elemento temporário removível, cuja função é exclusivamente conformar o concreto fresco, sem integrar a estrutura definitiva (justificativa baseada na NBR 6118, item 13.3).

A concretagem única sobre a treliça exposta elimina a junta fria inerente às vigotas pré-moldadas convencionais. O banzo inferior da treliça permanece totalmente envolvido pelo concreto novo, indicando maior aderência e menor suscetibilidade a delaminações na interface.

#### 3.2 Evidências experimentais do protótipo

O protótipo confirmou a exequibilidade do processo executivo: não foram observados vazamentos de nata, deformações plásticas permanentes, deslocamentos significativos ou dificuldades de desforma. A peça desformada apresentou superfície regular e geometria coerente com a fôrma empregada (Tabela 1). A estabilidade durante a concretagem foi comprovada pela ausência de vibrações excessivas ou de deslocamentos das fôrmas.

#### 3.3 Desempenho econômico

Com base nos custos médios de materiais e mão de obra, o custo total por metro quadrado do sistema proposto foi 55,2% inferior ao do sistema com EPS, considerando 100 ciclos de reutilização (Tabela 3). Conforme ilustrado na Figura 3, o sistema proposto torna-se mais vantajoso do que o convencional a partir do 15º ciclo.

O ponto de equilíbrio (break-even) ocorre entre o 12º e o 15º ciclo, frente ao EPS, e entre o 19º e o 22º ciclo, frente à lajota cerâmica. O payback (tempo de retorno do investimento inicial) é de 3,5 meses, assumindo-se um ciclo por semana (ritmo construtivo típico de edifícios de múltiplos pavimentos). Para 100 ciclos, a economia acumulada em relação ao sistema com EPS atinge aproximadamente R\$ 5.800 por 1.000 m<sup>2</sup>.

#### 3.4 Balanço ambiental

A Tabela 4 mostra que a adoção do sistema proposto evita a emissão de aproximadamente 5.800 kg CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup> de laje. Este valor equivale às emissões anuais de 1,3 automóveis de passeio no Brasil (média de 4.500 kg CO<sub>2</sub>/veículo/ano, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022). A diluição do impacto de fabricação das formas de aço ao longo de 100 ciclos praticamente neutraliza o acréscimo de emissões, demonstrando que a estratégia de reuso compensa o impacto incorporado do aço quando amortizado ao longo de múltiplos ciclos.

### 4 DISCUSSÃO

#### 4.1 Comparação com sistemas existentes e ganho de monolitismo

A **Tabela 5** posiciona o sistema proposto em relação às alternativas consolidadas.

**Tabela 5 – Comparação qualitativa entre sistemas construtivos**

Critério	Sistema Proposto	<i>Steel Mold</i> (Conceito Industrial)	<i>Fit Slab</i> (Daliform, 2020)	Convencional (EPS)
Elimina vigota pré-moldada	Sim	Não	Não	Não
Fôrma reutilizável	Sim	Sim	Não (perdida)	Não
Geração de resíduos	Muito baixa	Baixa	Média	Alta
Monolitismo estrutural	Total	Parcial	Parcial	Parcial

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Daliform Group (2020).

O sistema *Steel Mold* remove o enchimento, mas mantém a vigota pré-moldada, preservando a junta fria. O *Fit Slab* utiliza fôrma de polipropileno descartável, combinada a vigotas pré-fabricadas; apresenta peso próprio reduzido, mas gera resíduos plásticos e depende de elementos perdidos (Daliform Group, 2020). O sistema convencional combina vigota e EPS, gerando elevado volume de resíduos de espuma e exigindo descarte adequado. Já o sistema proposto elimina ambos os componentes perdidos, resultando em monolitismo integral e em uma laje completamente moldada *in loco*.

#### 4.2 Comparação aprofundada com literatura internacional

O uso de formas metálicas e de sistemas híbridos de alta reutilização tem sido discutido em pesquisas recentes. Baskaran et al. (2025) analisaram diferentes combinações de materiais (madeira, aço, alumínio e plástico) por meio de um LCA integrado ao BIM. Os autores destacaram que o custo e as emissões das formas representam uma parcela significativa do impacto total das estruturas de concreto, podendo corresponder a 50–60% do custo das obras. Na mesma investigação, classificaram-se as formas em tradicionais, flexíveis e recicláveis, observando-se que as opções híbridas, que combinam aço, alumínio e plástico, apresentaram maior reutilização e menor coeficiente de desgaste. Na literatura europeia, sistemas de lajes vazadas, como Cobiax e BubbleDeck, reduzem o consumo de concreto e o peso próprio por meio de insertos plásticos, mas mantêm a necessidade de armaduras de reforço complexas e, em muitas aplicações, preservam a interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado *in loco* (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2000; CHUNG et al., 2015). No cenário internacional, pesquisas sobre a viabilidade de sistemas de formas metálicas reutilizáveis (CASSAGNABÈRE et al., 2014; WANG et al., 2020) validam a redução de impactos ambientais e de custos operacionais; contudo, tais soluções frequentemente ainda se vinculam ao uso de elementos de enchimento ou a métodos tradicionais de vigotas. Portanto, a proposta deste trabalho diferencia-se por eliminar simultaneamente a vigota pré-moldada e o enchimento descartável (EPS/Cerâmica), utilizando uma treliça metálica autoportante, integrada a fôrmas metálicas removíveis, com validação experimental e quantificação explícita dos benefícios ambientais.

No que se refere à sustentabilidade, Wu et al. (2021) demonstraram que a prefabricação reduz, em média, os resíduos de construção e demolição em 52% e que a integração de tecnologias digitais (BIM, RFID, IoT) permite monitorar componentes e reduzir desperdícios na origem. Esses achados alinham-se à estratégia do sistema proposto, que elimina elementos perdidos e permite o rastreamento dos ciclos de reutilização das fôrmas metálicas.

Nam et al. (2023) compararam fôrmas sintéticas de resina com fôrmas metálicas (Euro Form) e concluíram que, quando se considera o número de reutilizações, as emissões de CO<sub>2</sub> das fôrmas de resina podem ser cerca de 32% inferiores às das metálicas. Contudo, a maior durabilidade e resistência mecânica do aço (superior a 150 ciclos, conforme Direct Scaffold Supply, 2025) ainda favorecem o sistema metálico em aplicações de alta repetição, como edifícios de múltiplos pavimentos – contexto para o qual o presente sistema foi concebido.

Sob a ótica ambiental, o resultado está em linha com discussões sobre economia circular no ambiente construído (Pomponi; Moncaster, 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2019), nas quais a reutilização de componentes temporários tende a ser preferível ao consumo recorrente de unidades sacrificiais, desde que o impacto inicial do material reutilizado seja adequadamente amortizado ao longo do uso. Apesar dos benefícios técnicos, econômicos e ambientais demonstrados, a adoção em larga escala de sistemas de formas metálicas reutilizáveis ainda enfrenta barreiras significativas. Entre elas, destacam-se a resistência cultural à mudança de métodos construtivos consolidados, a necessidade de investimento inicial elevado por parte das construtoras e a ausência de mecanismos de financiamento ou de incentivos fiscais específicos para práticas de economia circular na construção civil brasileira (Pinto; Gonzalez, 2018). Além disso, a padronização dimensional das fôrmas e a certificação de qualidade por terceiros (ex.: selo de conformidade para sistemas reutilizáveis) são elementos ainda incipientes no mercado nacional, diferentemente do que ocorre em países da União Europeia, onde diretrizes, como a Construction Products Regulation (UE) n.º 305/2011, estabelecem requisitos para a comercialização de sistemas de fôrmas com base no desempenho e na durabilidade. Estudos futuros deveriam investigar modelos de negócio baseados em locação e consórcios de fôrmas, bem como políticas públicas que estimulem a substituição de materiais descartáveis por soluções reutilizáveis, alinhando a construção civil às metas de descarbonização do Brasil no Acordo de Paris.

### 4.3 Implicações práticas e condições de aplicação

O sistema é particularmente indicado para edifícios residenciais ou comerciais com múltiplos pavimentos ( $\geq 4$ ), obras seriadas (condomínios, conjuntos habitacionais) e modelos de negócio baseados em locação de fôrmas. Nestas condições, o número de ciclos supera rapidamente a faixa de break-even, convertendo o custo inicial em vantagem competitiva.

O uso em residências unifamiliares isoladas, pequenas reformas ou obras com baixa repetição ( $< 10$  ciclos) apresenta retorno econômico limitado. Para maximizar os benefícios, recomenda-se treinamento da equipe de montagem, implementação de um plano de manutenção preventiva das fôrmas e adoção de uma plataforma digital (BIM) para planejar a logística e monitorar o número de ciclos, conforme sugerido por Wu et al. (2021).

A generalização do método para lajes H16, H20, H25 e H30 é plausível em termos conceituais, desde que a geometria da fôrma, a rigidez da chapa, a malha de escoramento e a verificação de deformações sejam recalibradas para as novas alturas de nervura e as cargas associadas. Para alturas superiores, recomenda-se a inclusão de nervuras de reforço na chapa ou o aumento da espessura para 1,5 mm.

### 4.4 Limitações do estudo

- **Escala experimental:** o protótipo de 0,60 m  $\times$  0,60 m não representa integralmente o comportamento de lajes contínuas com vãos de 4 m a 6 m, especialmente quanto às flechas globais, à vibração e à redistribuição de esforços.
- **Instrumentação:** não foram empregados extensômetros, LVDT ou sensores de pressão; as conclusões experimentais baseiam-se em observação sistemática e verificação analítica.
- **Escopo da ACV simplificada:** a análise concentrou-se no carbono incorporado do EPS evitado e do aço das fôrmas, sem considerar integralmente o transporte, a logística reversa, a manutenção, a eventual galvanização adicional e o fim de vida. Uma ACV cradle-to-grave seria necessária para a consolidação ambiental definitiva.
- **Variabilidade macroeconômica:** o ponto de equilíbrio (entre 12 e 22 ciclos) é sensível às flutuações regionais nos preços do aço (fôrmas) e dos derivados do petróleo (EPS). Em cenários de alta do aço, a curva de *break-even* pode deslocar-se para a direita.
- **Desempenho no Estado Limite Último (ELU):** o estudo não incluiu ensaios destrutivos para quantificar o ganho real na resistência ao cisalhamento horizontal no ELU.

- **Curva de aprendizado e mão de obra:** o custo marginal adotado pressupôs a presença de operários treinados. Estudos de tempos e movimentos são necessários para quantificar a perda de produtividade nos primeiros ciclos de montagem e desmontagem.

## CONCLUSÕES

O sistema analisado demonstrou viabilidade técnica quanto ao comportamento das fôrmas metálicas, com tensão atuante de 87,5 MPa, inferior à tensão admissível de 112 MPa, e coeficiente de segurança de 3,2. A flecha calculada (1,41 mm) manteve-se em faixa compatível com a natureza temporária do componente.

A substituição da vigota pré-moldada por treliça metálica simples, associada à concretagem única, eliminou a junta fria característica do sistema convencional, indicando ganho de monolitismo e potencial melhoria da aderência entre aço e concreto, conforme fundamentos da NBR 6118 e da literatura clássica.

A viabilidade econômica mostrou-se dependente do número de ciclos de reutilização, com ponto de equilíbrio entre o 12º e o 15º ciclo frente ao EPS e entre o 19º e o 22º ciclo frente à cerâmica. O payback estimado foi de 3,5 meses (ciclo semanal). Para 100 ciclos, a economia atingiu 55,2% em relação ao sistema com EPS.

A análise ambiental simplificada indicou emissões líquidas evitadas de aproximadamente 5.800 kg CO<sub>2</sub>e por 1.000 m<sup>2</sup> de laje H12, demonstrando que a estratégia de reuso pode compensar o impacto incorporado do aço ao longo de múltiplos ciclos. Este valor equivale às emissões anuais de cerca de 1,3 automóveis de passeio.

Este estudo consiste na proposição e validação analítico-experimental de um sistema que integra treliça autoportante e fôrma metálica reutilizável, eliminando simultaneamente os dois componentes de maior impacto econômico e ambiental do sistema convencional de lajes treliçadas: a vigota pré-moldada e o enchimento descartável. Diferencia-se das soluções internacionais (Steel Mold, Fit Slab, Cobiax, BubbleDeck) por não depender de vigota pré-moldada nem de elementos perdidos, e por apresentar quantificação explícita de custos, ciclo de vida e emissões, com referências atualizadas até 2025.

Como desdobramentos naturais deste estudo, recomenda-se para trabalhos futuros: executar ensaios de flexão em escala plena (vão de 5 m) com instrumentação completa (extensômetros, LVDT), visando à calibração de modelos em elementos finitos; avaliar o comportamento dinâmico (vibrações) para pisos de edifícios comerciais e hospitalares; expandir a análise para lajes H16, H20, H25 e H30, recalibrando a geometria da fôrma e o escoramento; desenvolver análise de ciclo de vida completa (cradle-to-grave) com cenários de transporte, manutenção, logística reversa e reciclagem do aço; quantificar a curva de aprendizado da mão de obra por meio de estudos de tempos e movimentos; e elaborar um manual executivo de fabricação, montagem, desforma e manutenção das fôrmas metálicas.

## REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1**: Laje pré-fabricada – Requisitos – Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15696**: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABRAPEX. Manual de utilização do EPS na construção civil. 1. ed. São Paulo: PINI, 2006.

BASKARAN, D.; CHOCKKALINGAM, U.; SENTHIL MUTHALVAN, R. Assessment of sustainable hybrid formwork systems using life cycle assessment and the wear-out coefficient – a case study. **Buildings**, v. 15, p. 1630, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15101630>.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CASSAGNABÈRE, C. et al. Analysis of the cost and carbon footprint of concrete formwork systems. **Organization, Technology and Management in Construction**, v. 6, n. 1, p. 913–925, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5592/otmcj.2014.1.3>.

CHUNG, J.-H. et al. Design of voided slab system and its structural performance. **Applied Sciences**, v. 5, n. 4, p. 1445–1461, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/app5041445>.

DALIFORM GROUP. Fit Slab: lightweight bidirectional voided slabs – Technical manual for precast concrete slabs. Treviso, Italia: Daliform Group, 2020. Disponível em: <https://www.daliform.com>. Acesso em: 04 abr. 2026.

DIRECT SCAFFOLD SUPPLY. **Steel formwork: strong, reusable, and cost-effective**. Houston: DSS Inc., 2025. Disponível em: <https://dss.net/steel-formwork/>. Acesso em: 03 abr. 2026.

ECOINVENT. **Ecoinvent database version 3.8**. Zurich: Swiss Center for Life Cycle Inventories, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular economy in the built environment**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2019.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Bond of reinforcement in concrete**. Lausanne: fib, 2000. (fib Bulletin 10).

FORMOSO, C. T.; SANTOS, A.; POWELL, J. An exploratory study on the applicability of process transparency in construction sites. **Journal of Construction Research**, v. 3, n. 1, p. 35-54, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1609945102000102>.

GIBB, A. G. F. **Off-site fabrication: prefabrication, pre-assembly and modularisation**. Loughborough: CIRIA, 1999.

HURD, M. K. Formwork for concrete. 7th ed. Farmington Hills: American Concrete Institute (ACI SP-4), 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.

KENDALL, A. **Life cycle costing for engineers**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. v. 1.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> no setor de transportes**. Brasília: MCTI, 2022.

NAM, K. Y.; LIM, M. K. Life cycle environmental impact assessment and applicability of synthetic resin formwork. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 696, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16020696>.

PIMENTEL, M.; PEREIRA, C.; SOUSA, C. Biaxial voided slabs: state of the art and design considerations. **Engineering Structures**, v. 94, p. 98-112, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.024>.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: EESC-USP, 2007.

PINTO, T. P.; GONZÁLEZ, J. L. Gestão de resíduos na construção civil. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2018.



PLASTICS EUROPE. **Eco-profiles and environmental product declarations of the European plastics manufacturers**. Brussels: Plastics Europe, 2020. Disponível em: <https://plasticseurope.org/resources/eco-profiles/>. Acesso em: 04 abr. 2026.

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Circular economy for the built environment: a research framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 710-718, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>.

SCHNELLENBACH-HELD, M.; PFEIFFER, K.; KARAKAS, A. Voided slab systems: design and construction. **Beton- und Stahlbetonbau**, v. 95, n. 8, p. 467-475, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1002/best.200000820>.

SOUZA, U. E. L. Como reduzir perdas nos canteiros de obras. São Paulo: PINI, 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; ZENG, S. X.; NG, W. C. Y. Towards adoption of prefabrication in construction. **Building and Environment**, v. 42, n. 10, p. 3642-3654, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.003>.

TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1959.

WANG, Y.; ZHANG, H.; CHEN, J. Economic and environmental assessment of reusable steel formwork in Chinese construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 120789, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120789>.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Life cycle assessment methodology report**. Brussels: Worldsteel, 2021. Disponível em: <https://worldsteel.org/publications/>. Acesso em: 04 abr. 2026.

WU, Z.; LUO, L.; LI, H.; WANG, Y.; BI, G.; ANTWI-AFARI, M. F. An analysis on promoting prefabrication implementation in the construction industry towards sustainability. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 21, p. 11493, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph182111493>.