




Received:
January 3, 2026

Accepted:
May 6, 2026

Published:
May 8, 2026

Theoretical and experimental study of precast slabs reinforced in one direction

Flaviane da Rocha Pereira¹ , Matheus Augusto Costa de Oliveira² , Thiago Bomjardim Porto³ 

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Curvelo, Brazil.

Email address

flaviane_rochap@outlook.com (Flaviane R. Pereira) – Corresponding author.

matheuscosta158056@gmail.com (Matheus A.C. Oliveira)

thiago.porto@cefetmg.br (Thiago B. Porto)

Abstract

This article presents a case study of the precast slab construction system with the objective of analyzing the accuracy of theoretical structural design methods in comparison with its real mechanical behavior in terms of both ELS and ELU. For the analysis, a 200x200 cm precast slab was built, composed of commercial beams with a height of 8 cm, a base of 12 cm, reinforced with 4.2 mm CA-60 steel. The slab was filled with ceramic tiles and received a 5 cm concrete cap, resulting in a final thickness of 13 cm. The concrete used was of the ARI type, with a minimum characteristic strength of 25 MPa. After a 28-day curing, the shoring was removed in accordance with NBR 6118 (ABNT, 2023), and the load test began in 10 sequential and cumulative stages to measure the displacements immediately up to the ultimate limit state (ELU). The initial experimentally predicted plans were close to the analytically predicted values, validating the theory for the serviceability limit state (SLS). In the ELU, the experimental rupture load was 23.22 kN/m², significantly higher than that found theoretically, confirming the safety of the analytical formulations. Thus, the precast system was considered well characterized by the theoretical model, reinforcing its applicability in future studies.

Keywords: Precast reinforced concrete slabs, Beams, Rupture, Simple bending.

1. Introdução

As lajes pré-moldadas do tipo vigota destacam-se entre os sistemas estruturais mais utilizados em edificações residenciais e comerciais de pequeno e médio porte, principalmente devido à racionalização construtiva, redução do peso próprio, menor demanda de formas e escoramentos, rapidez executiva e viabilidade econômica (El Debs, 2017; Nascimento, 2022; Silva, 2025). Esses sistemas são constituídos por vigotas de concreto armado ou protendido associadas a elementos de enchimento, como blocos cerâmicos, blocos de concreto ou materiais leves industrializados, sobre os quais é executada uma camada de concreto moldada no local responsável pela integração estrutural do conjunto. Além da redução do consumo de concreto, as lajes pré-moldadas contribuem para o aumento da produtividade, maior controle

executivo e otimização dos processos construtivos (Caixeta; Hannum, 2018; Wang et al., 2018; Kaspary et al., 2022).

A análise do comportamento estrutural das lajes pré-moldadas está diretamente associada à verificação dos estados-limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Segundo Kimura (2018), o Estado Limite Último (ELU) está relacionado às condições de colapso estrutural, enquanto o Estado Limite de Serviço (ELS) refere-se ao desempenho da estrutura em condições normais de utilização, considerando deformações excessivas, fissuração e comprometimento funcional dos elementos estruturais.

O desempenho das lajes pré-moldadas está diretamente relacionado às propriedades mecânicas do concreto empregado, especialmente à resistência à compressão, parâmetro fundamental para o dimensionamento e verificação estrutural. No

Brasil, a classificação dos concretos estruturais é regulamentada pela NBR 8953 (ABNT, 2015), que estabelece requisitos relativos à resistência característica, massa específica e consistência dos materiais empregados.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), as lajes nervuradas são elementos estruturais moldados no local ou compostos por nervuras pré-moldadas, nos quais as tensões de tração decorrentes dos momentos positivos concentram-se nas nervuras, permitindo a utilização de materiais inertes entre elas. Essa configuração proporciona redução do peso próprio e otimização do consumo de concreto, mantendo a rigidez e a capacidade resistente necessárias para suportar as ações previstas em projeto. Além disso, as vigotas são regulamentadas pela NBR 14859-1 (ABNT, 2016), que estabelece requisitos para fabricação, recebimento e utilização dos componentes pré-fabricados empregados na execução de lajes.

Em função da ampla utilização desses sistemas e da necessidade de melhor compreensão do seu comportamento sob diferentes condições de carregamento e execução, diversos estudos recentes têm investigado o desempenho estrutural, a viabilidade técnica e a racionalização construtiva das lajes pré-moldadas e nervuradas. Nascimento (2021) destaca que o avanço das tecnologias construtivas e a busca por sistemas mais econômicos e industrializados intensificaram a utilização das lajes pré-fabricadas, principalmente devido à padronização dos elementos, redução de falhas executivas e aumento da produtividade. De forma semelhante, Abecassis et al. (2022) observaram que as lajes pré-moldadas apresentam vantagens relacionadas à redução do consumo de materiais, menor demanda de mão de obra, rapidez executiva, baixo peso próprio e maior versatilidade construtiva quando comparadas às lajes convencionais moldadas in loco.

Investigações experimentais e numéricas também vêm sendo desenvolvidas para avaliar o comportamento estrutural e os métodos de dimensionamento aplicados às lajes nervuradas. Damasceno (2022) realizou análises experimentais em lajes treliçadas pré-moldadas submetidas a carregamentos distribuídos, enquanto Nepomuceno (2022) comparou diferentes metodologias de cálculo, incluindo procedimentos normativos e modelos numéricos baseados em elementos finitos, concluindo que os métodos convencionais previstos em norma tendem a apresentar resultados

conservadores quando comparados às análises numéricas detalhadas. De forma semelhante, Maronez (2022) avaliou sistemas contínuos com vigotas treliçadas e observou reduções significativas nos deslocamentos e no consumo de aço em função da continuidade estrutural.

Estudos recentes também investigaram a influência de parâmetros geométricos e construtivos no desempenho das lajes. Martins et al. (2023) destacam que o aumento da competitividade na construção civil impulsionou o desenvolvimento de sistemas estruturais mais rápidos e economicamente viáveis, favorecendo a ampliação do uso das lajes nervuradas em edificações de múltiplos pavimentos. Hübner (2023), por sua vez, avaliou experimentalmente a influência da espessura da capa de concreto complementar na distribuição transversal de cargas em lajes com vigotas protendidas, concluindo que o vão longitudinal representa a principal variável associada à redistribuição dos esforços.

Estudos internacionais têm destacado a crescente aplicação de sistemas pré-fabricados em concreto armado e protendido, especialmente em estruturas que demandam menor peso próprio, maior produtividade e processos construtivos industrializados. Al-Issawi et al. (2023) analisaram os principais parâmetros que influenciam a resistência e a rigidez de sistemas nervurados e compostos, verificando que a espessura da laje e a altura das nervuras exercem influência significativa no desempenho estrutural. Zhang et al. (2024) propuseram um sistema de laje pré-fabricada desmontável para estruturas metálicas composto por unidades modulares conectadas mecanicamente, demonstrando elevada integridade estrutural e potencial para acelerar os processos executivos sem necessidade de concretagem no local.

Nesse contexto, Wang et al. (2018) observaram que os sistemas em concreto pré-moldado apresentam vantagens significativas em relação às estruturas moldadas in loco, principalmente em razão do controle industrial do processo produtivo, melhores condições de cura e maior precisão geométrica dos elementos estruturais. Segundo os autores, a utilização de tecnologias industrializadas contribui para a obtenção de materiais com elevado desempenho, redução do consumo de recursos e maior rapidez executiva, tornando os sistemas pré-fabricados alternativas técnica e economicamente viáveis para diferentes tipos de edificações.

Alinhados a esses estudos, Leão et al. (2024) realizaram análises comparativas entre lajes treliçadas pré-moldadas e lajes convencionais, destacando a viabilidade técnica e econômica dos sistemas pré-fabricados, especialmente quanto à rapidez construtiva e racionalização da execução. Mais recentemente, Chen et al. (2025) investigaram experimentalmente a rigidez à flexão de lajes compostas vazadas em concreto armado e propuseram um modelo analítico com elevada concordância entre os resultados teóricos e experimentais. Maheri et al. (2025) avaliaram diferentes configurações de sistemas pré-moldados protendidos submetidos a esforços de flexão e cisalhamento, verificando que sistemas com reforço ao cisalhamento apresentaram maior ductilidade e melhor capacidade resistente em comparação aos sistemas convencionais.

Estudos experimentais comparando o comportamento real de sistemas pré-moldados com os modelos teóricos de dimensionamento têm demonstrado a importância da validação experimental dos procedimentos analíticos. Kaspary et al. (2022), ao investigarem lajes compostas por vigotas protendidas e diferentes materiais de enchimento, observaram comportamento estrutural semelhante entre sistemas com enchimento cerâmico e EPS em relação à capacidade resistente e aos momentos fletores máximos, embora os sistemas com EPS tenham apresentado maiores deflexões. Os autores também verificaram boa concordância entre os resultados experimentais e teóricos para determinadas configurações analisadas.

De forma complementar, Mahmoud e Al-Quraishy (2012) destacam que análises experimentais e numéricas aplicadas a elementos pré-moldados apresentaram elevada compatibilidade entre os resultados teóricos e experimentais, especialmente em relação ao comportamento carga-deflexão e à capacidade resistente. Segundo os autores, a integração entre modelos computacionais e ensaios experimentais contribui para maior confiabilidade das avaliações estruturais e melhor compreensão dos mecanismos de deformação e ruptura em sistemas pré-fabricados submetidos à flexão.

Embora diversos estudos tenham investigado o comportamento estrutural de sistemas pré-

moldados, ainda são limitadas as análises experimentais em escala real voltadas à validação dos modelos teóricos de dimensionamento aplicados a lajes pré-moldadas unidirecionais comercialmente utilizadas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho estrutural de uma laje pré-moldada unidirecional em concreto armado por meio de ensaio experimental em escala real e comparação com as previsões teóricas de dimensionamento estabelecidas pelas normas vigentes. Busca-se analisar o comportamento da estrutura até a ruptura, considerando materiais e técnicas executivas usualmente empregadas na região central do estado de Minas Gerais.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento desta pesquisa, executou-se um experimento piloto, em escala real, de uma laje pré-fabricada em concreto armado, sistema amplamente empregado em edificações unifamiliares de pequeno e médio porte, especialmente em empreendimentos habitacionais vinculados ao programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV), do Governo Federal. Segundo o Ministério das Cidades (BRASIL, 2024), o programa MCMV foi criado com o objetivo de reduzir o déficit habitacional brasileiro por meio da ampliação do acesso à moradia para famílias de baixa renda.

A pesquisa foi conduzida com o propósito de reproduzir condições executivas comumente adotadas na prática construtiva regional, utilizando materiais comerciais e procedimentos usuais de execução empregados no município de Curvelo-MG. A Figura (1) apresenta o fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas ao longo da pesquisa.

2.1. Definição do local do ensaio

A Figura (2) apresenta a localização onde foi realizado o experimento de prova de carga. O ensaio foi conduzido no município de Curvelo-MG, em área cedida pela empresa Pré-Moldados Líder, onde a estrutura experimental foi executada e posteriormente submetida ao carregamento.

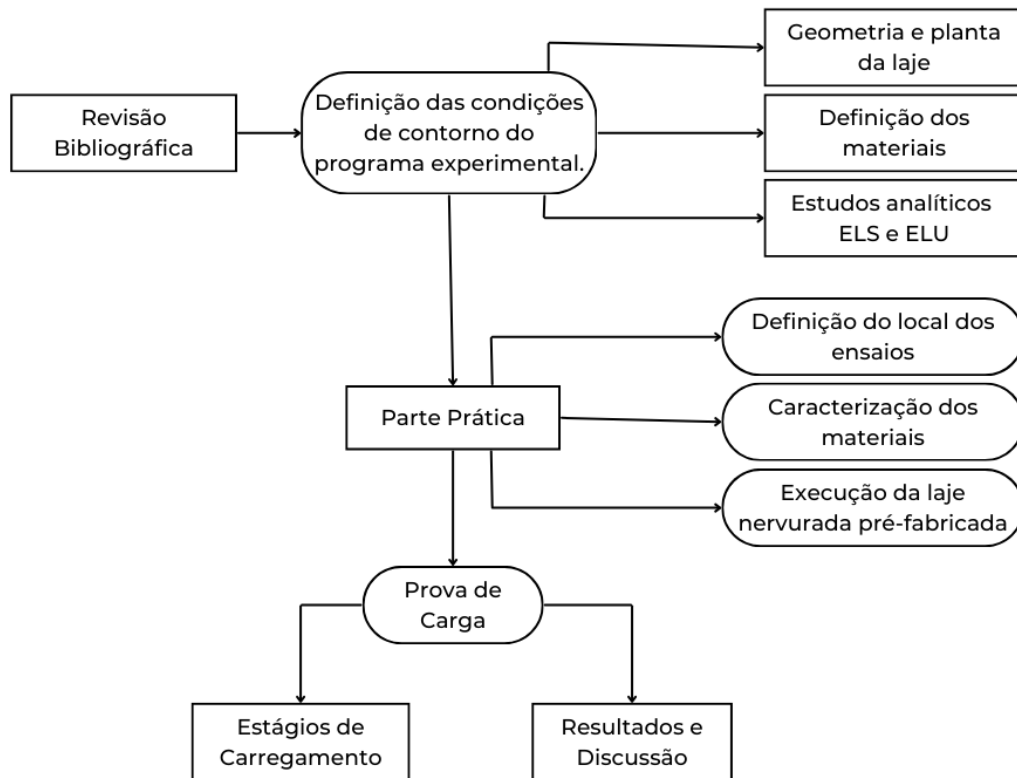


Figura 1 – Fluxograma metodológico das atividades realizadas na pesquisa.

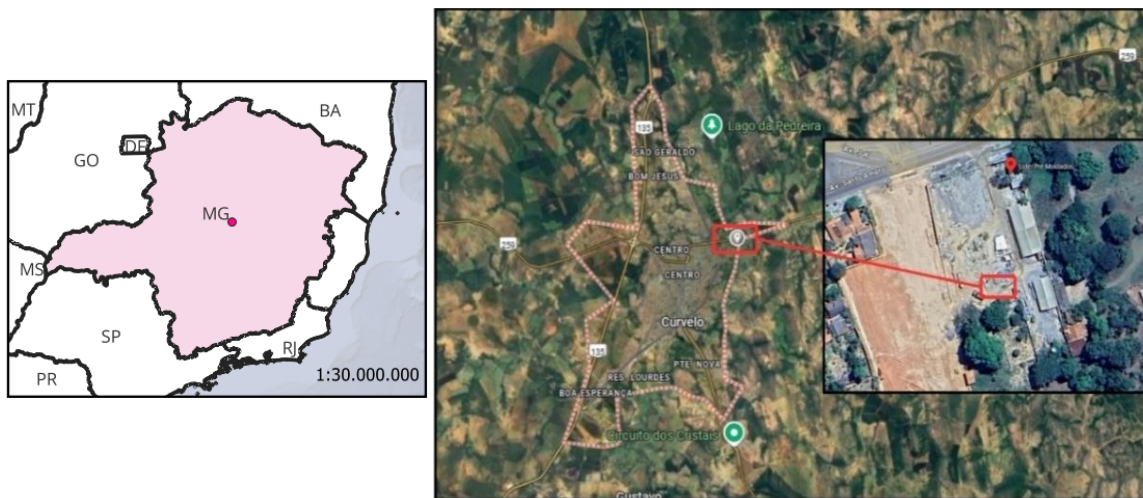


Figura 2 – Localização onde foi realizado o ensaio de desempenho da laje pré-fabricada, Curvelo – MG.

2.2. Caracterização dos materiais

2.2.1. Montagem e ensaio da estrutura real

Foi construída e ensaiada uma laje unidirecional em concreto armado composta por vigotas pré-moldadas, elementos cerâmicos de enchimento e capeamento de concreto moldado no local. A estrutura experimental foi executada em conformidade com as recomendações das normas NBR 5738 (ABNT, 2015), NBR 6118 (ABNT, 2023), NBR 6120 (ABNT, 2019), NBR 14859-1 (ABNT, 2016) e NBR 15522 (ABNT, 2007).

A laje apresentou dimensões em planta de (200×200) cm e foi composta por cinco vigotas pré-moldadas com 12 cm de base e 8 cm de altura, armadas com dois fios de aço CA-60 de 4,2 mm de diâmetro. O sistema recebeu enchimento com lajotas cerâmicas e capeamento de concreto com espessura de 5 cm, resultando em espessura final de 13 cm. O aço de distribuição, constituído por fios CA-60 de 4,2 mm, foi disposto perpendicularmente às vigotas a cada 40 cm, conforme especificação do fornecedor. A representação esquemática da unidade padrão é apresentada na Figura (3).

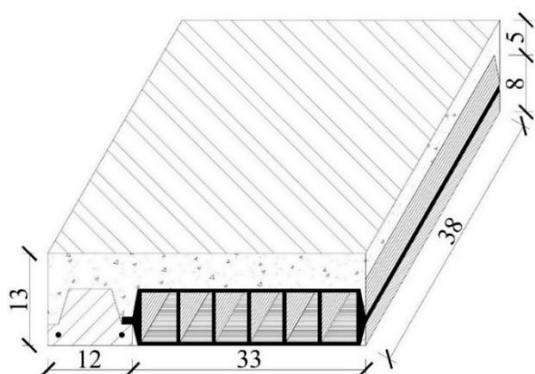


Figura 3 – Ilustração da unidade padrão; medidas em centímetros.

Após a concretagem, a estrutura permaneceu em processo de cura durante 28 dias, conforme previsto pelas normas técnicas aplicáveis, sendo realizada hidratação periódica do concreto ao longo desse intervalo.

Para avaliação do comportamento estrutural da laje e determinação da carga última no Estado-Limite Último (ELU), foi aplicado um carregamento distribuído uniformemente em etapas incrementais, utilizando sacos de cimento comercial com massas de 40 kg e 50 kg, além de placas pré-moldadas de concreto com massa aproximada de 48 kg.

Os deslocamentos verticais foram monitorados em dois pontos localizados na região central da laje, utilizando linhas de referência fixadas externamente à estrutura experimental. As medições foram realizadas com paquímetro manual com precisão de 0,05 mm, permitindo o acompanhamento dos deslocamentos imediatos da estrutura ao longo das etapas de carregamento até a ruptura. A Figura (4) apresenta o esquema adotado para aplicação das cargas durante o ensaio.



Figura 4 – Representação esquemática das etapas do carregamento da laje pré-moldada.

2.2.2 Investigação do concreto

Durante a concretagem do capeamento da laje pré-moldada, foram moldados três corpos de prova cilíndricos para verificação da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

O traço do concreto foi dosado para resistência característica de 25 MPa, sendo preparado em betoneira no próprio local de execução da estrutura experimental. Foram utilizados cimento CP V ARI, areia grossa como agregado miúdo e britas 0 e 1 como agregados graúdos, adotando-se a proporção volumétrica 1:2:2:1.

A escolha do cimento CP V ARI ocorreu em função da elevada resistência inicial proporcionada por esse material, característica importante para o acompanhamento experimental da estrutura e para o controle tecnológico do concreto em curto período de cura.

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais indicaram resistência à compressão satisfatória, sendo adotado no dimensionamento teórico o valor experimental de f_{ck} igual a 24,5 MPa.

2.2.3 Dimensionamento teórico do sistema laje pré-moldada

O dimensionamento teórico foi realizado com o objetivo de representar uma aplicação convencional do sistema construtivo de lajes pré-moldadas empregado em edificações residenciais de pequeno porte.

A estrutura analisada consistiu em uma laje destinada à utilização como piso, as vigotas possuem comprimento total de 230 cm, garantindo um vão livre de 200 cm e apoios de 15 cm em cada extremidade sobre as paredes de alvenaria.

Foram adotados materiais e elementos comerciais normalmente empregados na região de estudo, incluindo vigotas pré-moldadas com 12 cm de base e 8 cm de altura, elementos cerâmicos de enchimento com dimensões de 33 cm × 8 cm × 19 cm e capeamento de concreto com espessura de 5 cm.

As ações consideradas no dimensionamento seguiram as recomendações da NBR 6120 (ABNT, 2019) e de Porto e Fernandes (2015), adotando-se carga de revestimento de 1,0 kN/m² e sobrecarga de

utilização de 1,5 kN/m², compatível com ambientes residenciais como dormitórios, salas, cozinhas e sanitários.

O peso próprio da laje foi estimado em 2,55 kN/m² com base nas características geométricas e propriedades dos materiais empregados. Dessa forma, considerando-se o peso próprio, o revestimento e a sobrecarga de utilização, obteve-se carregamento total de cálculo igual a 5,05 kN/m².

As verificações estruturais foram realizadas considerando os Estados-Limites Último (ELU) e

de Serviço (ELS), conforme os critérios estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Foram avaliados parâmetros relacionados à resistência, deformação e comportamento estrutural da laje, incluindo verificação da flecha imediata e diferida no tempo.

A Tabela (1) apresenta os principais parâmetros adotados no dimensionamento teórico da estrutura experimental.

Tabela 1 – Parâmetros de cálculo para o dimensionamento teórico da laje pré-moldada.

Ações: Revestimento (G)	1,00 kN/m ²
Carga variável (Q)	1,50 kN/m ²
Dimensões da lajota cerâmica	33x8x19 cm ³
Dimensões da vigota	12x8x230 cm ³
Capecamento	5 cm
Peso específico lajota	13 kN/m ³
Peso específico concreto	25 kN/m ³
Fck adotado	24,5 MPa
CAA II: CN	2 cm
Vão de cálculo: a	215 cm
Vão de cálculo: b	200 cm
Espessura da mesa: hf	5 cm
Largura da mesa: bf	45 cm
Largura da nervura: bw	12 cm
Largura lateral viga T: b1	16,5 cm
Distância entre faces da viga: b2	33 cm

A partir dos parâmetros definidos, foi elaborado o memorial de cálculo simplificado da laje pré-moldada, com o objetivo de comparar os resultados analíticos obtidos teoricamente com os valores experimentais observados durante o ensaio de carga. Para a determinação desses parâmetros, adotou-se o modelo analítico de flexão simples aplicado a vigas de seção transversal do tipo “T”, conforme as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2023). O dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) foi realizado considerando o equilíbrio das forças atuantes na seção transversal,

utilizando-se a largura colaborante da mesa (bf), correspondente ao entre-eixo das vigotas, e resistência característica à compressão do concreto (fck) de 25 MPa. Para a verificação do Estado Limite de Serviço (ELS), os deslocamentos verticais foram estimados com base no modelo de viga biapoiada submetida a carregamento uniformemente distribuído, considerando-se a rigidez equivalente da seção fissurada em estágio II. Os principais resultados obtidos no dimensionamento teórico da estrutura são apresentados na Tabela (2).

Tabela 2 – Extrato do memorial de cálculo do dimensionamento teórico da laje pré-moldada.

Volume da unidade (V_{unid})	0,0222 m ³
Volume dos blocos (V_{bloc})	0,0100 m ³
Volume do concreto (V_{conc})	0,0122 m ³
Peso próprio unidade (PP_{unid})	0,4354 kN
Peso próprio (PP)	2,5460 kN/m ²
Peso próprio por vigota (pp)	1,1457 kN/m
Revestimento por vigota (g)	0,4500 kN/m
Utilização por vigota (q)	0,6750 kN/m
Sobrecarga por vigota (s)	0,0000 kN/m
Intensidade do momento fletor solicitante (K)	0,02268
Tensão de escoamento de cálculo (f_{yd})	52,174 kN/cm ²
Área de aço da seção transversal (A_s)	0,3240 cm ²
Área de aço mínima ($A_{s,min}$)	0,4815 cm ²
Área de aço adotada para a armadura ($A_{s,utilizado}$)	0,2770 cm ²
Combinação de ações em cada vigota (P) em relação ao ELU (F_d)	0,0318 kN/cm
Combinação de ações em cada vigota (P) em relação ao ELS ($F_{d,ser}$)	0,0180 kN/cm
Combinações frequentes de serviço (CF ELS-W) ($F_{d,ser}$)	0,0180 kN/cm
Combinações rara de serviço (CR) ($F_{d,ser}$)	0,0180 kN/cm
Momento para o estado limite último M(ELU)	183,6854 kN.cm
Momento pra o estado limite de serviço M(ELS)	103,9022 kN.cm
Momento de referência M(ref)	2844,8438 kN.cm
Altura útil da seção retangular (d)	11 cm
Resistência final de cálculo do concreto (f_c)	1,4875 kN/cm ²
Momento fletor mínimo $M_{d,min}$	117,57 kN.cm
Momento de fissuração (M_r)	137,5569 kN.cm
Cálculo da flecha imediata (f_o)	0,0548 cm
Cálculo da flecha diferida no tempo (f_∞)	0,1348 cm
Cálculo da flecha admissível (f_{adm})	0,86 cm

2.2.4 Montagem da laje pré-moldada

A estrutura experimental foi executada reproduzindo procedimentos construtivos correntemente empregados na execução de lajes pré-moldadas na região de Curvelo-MG.

Inicialmente, foi realizada a preparação do terreno e a execução da fundação superficial do tipo sapata corrida. O fundo da escavação foi compactado manualmente e preenchido com concreto dosado para resistência característica de 15 MPa, associado à utilização de pedras de mão, conforme ilustrado na Figura (5a).

Os apoios da estrutura foram executados com blocos vazados de concreto com dimensões de 15

cm × 19 cm × 29 cm, preenchidos internamente com concreto dosado para 15 MPa, resultando em paredes de apoio com altura aproximada de 60 cm, conforme apresentado na Figura (5b).

A laje foi montada utilizando cinco vigotas pré-moldadas e quarenta e quatro lajotas cerâmicas de enchimento, sendo o sistema escorado ao nível dos apoios durante a execução. Inicialmente, as vigotas foram posicionadas sobre os apoios e, posteriormente, realizou-se a distribuição dos elementos cerâmicos entre as nervuras estruturais, conforme ilustrado nas Figuras (5c) e (5d). Não foi adotado o recurso construtivo de contraflecha.

Após a montagem do sistema, o perímetro da laje foi delimitado com tábuas de madeira para

execução do capeamento. O concreto utilizado na capa estrutural foi dosado para resistência característica de 25 MPa e preparado em betoneira com capacidade de 400 L.

Decorrido o período de cura do concreto, as escoras foram removidas e a estrutura foi preparada para realização do ensaio de carga. A Figura (5) apresenta as principais etapas executivas da estrutura experimental.



Figura 5 – Representação das etapas executivas da laje pré-moldada a) fundação e início da execução dos apoios; b) paredes de apoio finalizadas; c) posicionamento das vigotas; d) distribuição das lajotas cerâmicas; e) execução do capeamento; f) estrutura finalizada.

2.2.5 Ensaio de carga

Foi montado, paralelamente à estrutura e de forma independente, na frente e na parte posterior, piquetes de madeira e entre eles uma linha de pedreiro atravessada, nivelada com a parte inferior da laje.

Para o primeiro carregamento, foi distribuído sobre a estrutura, 17 sacos de cimento fechados,

com peso aproximado de 40 kg, onde após verificado, não foi constatado deslocamento visível, como pode ser observado na Figura (6a). Os carregamentos na estrutura foram divididos em 10 etapas.

Para medir os deslocamentos, foi escolhido o ponto médio do vão, sendo medido os deslocamentos na frente e na parte posterior da laje. Dessa forma, foi possível verificar se a estrutura

estava rotacionando em relação ao eixo perpendicular ao vão de análise, o que não foi observado. O processo de carregamento da estrutura foi repetido, sendo estimado que com 500 kg/m² de sobrecarga, a estrutura já apresentaria sinais visíveis

de fadiga estrutural. Porém, só foi possível verificar as deformações com 1.000 kg/m², conforme mostra a Figura (6b), onde apenas apresentou vibração durante o tráfego dos ajudantes.



Figura 6 – Representação do ensaio de carga a) Início da aplicação do carregamento; b) Laje pré-moldada carregada com 1000 kg/m² na etapa 6; c) Deslocamento visível após carga de 1000 kg/m²; d) Estrutura carregada com 1892 kg/m² na etapa 9 e) Momento de ruptura da estrutura; f) ELU- Ruptura da laje após etapa 10 de carregamento.

A laje apresentou claramente sinais de fadiga estrutural, com fissuras nítidas na etapa de carregamento 9, conforme ilustra a Figura (6c), passando imediatamente do estágio I para o estágio II de cálculo, como pode ser observado na Figura (6d).

Como o risco de ruína era conhecido e a segurança dos envolvidos estava comprometida com o carregamento manual, foi utilizada uma

máquina (empilhadeira) para as etapas de carregamento 9 e 10, conforme mostra a Figura 6 (e).

A estrutura foi carregada com mais 430 kg/m² (4,30 kN/m²) na etapa 10, conforme ilustra a Figura (6e). No momento imediato a aplicação da carga a estrutura ruiu, não sendo possível saber quanto de carga a máquina aplicou a estrutura neste momento. Foi possível observar pelo operador da máquina,

que a carga foi inteiramente descarregada na estrutura por alguns instantes.

A Figura (6f) mostra a estrutura rompida. A laje “quebrou” no meio do vão, como era esperado, e as paredes de apoio rotacionaram para o lado externo. A estrutura foi desmontada após o ensaio de carga.

4. Resultados e discussões

O ensaio de carga foi realizado com 10 etapas incrementais, sendo que a estrutura possui peso próprio calculado de 255 kgf/m² (2,55 kN/m²).

O primeiro carregamento foi de 170 kgf/m² (1,70 kN/m²) e não gerou deslocamento visível. Foi acrescentado 160 kgf/m² (1,60 kN/m²) para o

segundo carregamento, sendo verificado um deslocamento de -1,25 mm. A partir do segundo carregamento, à medida que era realizado o incremento de sobrecarga, foi possível verificar o deslocamento estrutural.

A Tabela (3) apresenta as demais etapas de carregamento da estrutura.

Analisando os dados, observa-se que a estrutura testada suportou os esforços sem apresentar danos visíveis até a etapa 8 de carregamento. Na etapa 9, surgiram fissuras, e na etapa 10 ocorreu o colapso da estrutura. Assim, cada nível de solicitação na seção transversal resultou em comportamentos distintos, conforme ilustrado na Tabela (4).

Tabela 3 – Teste de carga realizado na laje real – Etapas de carregamento.

Etapa de carregamento	Carga aplicada kgf/m ²	Carga aplicada kN/m ²	Carga acumulada kgf/m ²	Carga acumulada kN/m ²	Deslocamento mm
0	0	0	255	2,55	0
1	170	1,70	425	4,25	0
2	160	1,60	585	5,85	-1,25
3	160	1,60	745	7,45	-1,70
4	160	1,60	905	9,05	-3,25
5	160	1,60	1065	10,65	-5,50
6	190	1,90	1255	12,55	-8,45
7	125	1,25	1380	13,80	-11,20
8	200	2,00	1580	15,80	-15,70
9	312	3,12	1892	18,92	-30,00
10	430	4,30	2322	23,22	Ruptura

Tabela 4 – Resultado estrutural devido à carga aplicada.

Carga aplicada na estrutura kg/m ²	Carga aplicada na estrutura kN/m ²	Momento fletor solicitante na seção transversal tf.m	Momento fletor solicitante na seção transversal kN.m	Resultado estrutural – Vão livre de 2,0 m
1580,00	15,80	0,4108	4,108	Deslocamento visível: Estádio I
1892,00	18,92	0,4919	4,919	Deslocamento visível e abertura de fissuras: Estádio II
2322,00	23,22	0,6038	6,038	Ruptura

Com a aplicação de uma carga adicional de 312 kgf/m² (3,12 kN/m²) na etapa 9, surgiram fissuras no ponto médio da estrutura, evidenciando a transição do estágio I para o estágio II, comportamento condizente com a teoria estrutural. Esse fenômeno ocorreu sob um carregamento total de 7568 kg distribuídos em 4 m², correspondendo a 1892 kgf/m² (18,92 kN/m²), com um deslocamento da ordem de 1/66. Para levar a estrutura ao estado-limite último (ELU), foram adicionados 100 sacos de cimento de 40 kg, 22 sacos de 50 kg e 74 peças pré-moldadas de meio-fio, totalizando uma sobrecarga de 9288 kg em 4 m². Esse valor,

correspondente a 2322 kgf/m² (23,22 kN/m²), representou o limite de resistência da laje, conduzindo a estrutura ao colapso.

Os valores dos deslocamentos calculados no ensaio de carga realizado na laje pré-moldada, estão de acordo com os valores calculados de forma analítica. Os valores apresentados na tabela abaixo, da flecha inicial obtida experimentalmente é referente à etapa 9 de carregamento. A Tabela (5) apresenta a comparação entre a flecha imediata (f_0) determinada pelo método analítico e aquela registrada no ensaio.

Tabela 5 – Comparação entre a flech inicial (f_0) calculada e a real.

Aplicação	Peso próprio - kg/m ²	Sobrecarga - kg/m ²	Carga total - kg/m ²	f_0 : Analítico - mm	f_0 : Ensaio - mm	Diferença - %
0	255	0	255	-0,35	-	34,92%
1	255	170	425	-0,58	-	58,24%
2	255	160	585	-1,06	-1,25	47,17%
3	255	160	745	-2,30	-1,70	85,19%
4	255	160	905	-3,94	-3,25	92,72%
5	255	160	1065	-5,80	-5,50	89,19%
6	255	190	1255	-8,08	-8,45	85,49%
7	255	125	1380	-9,56	-11,20	78,39%
8	255	200	1580	-11,87	-15,70	71,08%
9	255	312	1892	-15,28	-30,00	49,31%

Verifica-se que existe uma diferença discrepante entre os métodos utilizados para obter a flecha inicial de forma analítica e de forma mensurada no ensaio. Essa diferença pode estar relacionada com a dificuldade de obter as medidas dos deslocamentos no campo de ensaio, dado incidência de fatores externos, como vento, movimentação do pessoal e de máquinas gerando vibrações no terreno.

A leitura da deformação foi prejudicada, pois os materiais utilizados para a base da leitura, como linha de pedreiro, sarrafo e pontaletes, eram pouco precisos ao comparar com a unidade de medida a ser verificada. Além disso, o equipamento utilizado para medir a flecha, paquímetro manual, dependia da habilidade do operador para coletar os dados.

O exposto é exemplificado na Figura (7), traz a relação entre a flecha imediata calculada de forma analítica e a flecha imediata real medida durante o ensaio.

Ao examinar a Figura (7), observa-se que, até a etapa de carregamento 7, há uma maior proximidade entre os valores das flechas. Isso pode ser atribuído à maior facilidade na aplicação do carregamento durante essas etapas, o que evidencia a eficiência das formulações teóricas. No entanto, a partir dessa etapa, surgiram dificuldades para solicitar a laje, sendo necessária, nas etapas 9 e 10, a utilização de máquinas, o que acabou interferindo na qualidade do ensaio.

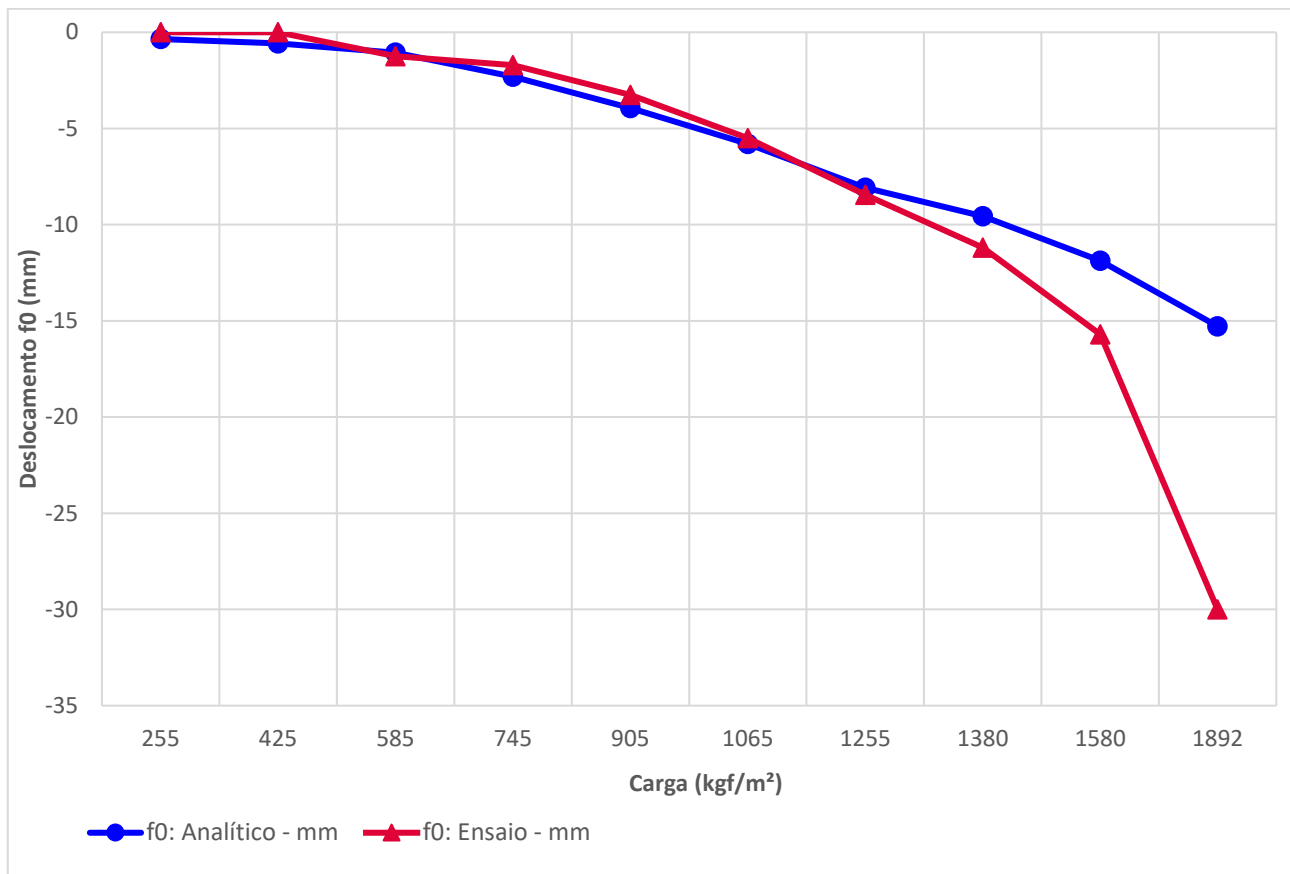


Figura 7 – Gráfico: Deslocamento f_0 x Carga - comparativo entre flecha calculada e flecha real.

Vale ressaltar que os resultados experimentais indicaram a ruptura da estrutura entre 7568 kgf e 9288 kgf, enquanto a análise teórica previu valores bem inferiores, entre 711,86 kgf e 1772,64 kgf. Essa diferença evidencia a influência de fatores não contemplados nos cálculos teóricos, destacando a necessidade de estudos complementares para aprimorar a precisão dos modelos analíticos no dimensionamento de lajes pré-moldadas.

4. Conclusão

Este estudo permitiu compreender as características do sistema construtivo de lajes pré-moldadas sob condições específicas de carregamento. Os ensaios realizados demonstraram que, embora esse sistema apresente segurança estrutural, ele pode sofrer deslocamentos que, apesar de não comprometerem sua integridade, podem causar desconforto aos usuários devido a vibrações excessivas. Esse aspecto destaca a importância de uma avaliação criteriosa das condições de uso para garantir o desempenho adequado da estrutura.

Os valores experimentais apresentaram tendência compatível com o modelo analítico nas etapas iniciais de carregamento, embora

divergências mais significativas tenham surgido em níveis elevados de solicitação. Além disso, a carga de ruptura obtida foi significativamente superior à prevista nos cálculos, indicando um fator de segurança adicional. Esses achados reforçam a confiabilidade das metodologias adotadas no dimensionamento das lajes pré-moldadas, demonstrando seu desempenho estrutural seguro e sua adequação para aplicação na construção civil.

Entretanto, observou-se que, à medida que o carregamento era intensificado, os deslocamentos experimentais começaram a divergir dos valores teóricos. Esse comportamento pode estar associado a fatores não contemplados integralmente nos cálculos, como a interação entre os materiais e variações na execução da laje. Assim, ressalta-se a importância de um controle rigoroso na fabricação das vigotas e na aplicação do concreto de capeamento, a fim de assegurar maior uniformidade e aderência entre os elementos estruturais.

Outro aspecto relevante identificado foi a elevada resistência da estrutura antes da ruptura, o que evidencia sua capacidade de suportar cargas significativas sem falhas imediatas. No entanto, a ocorrência de flechas excessivas pode comprometer tanto a durabilidade da construção quanto o conforto dos usuários. Dessa forma, recomenda-se

que os projetos considerem não apenas a segurança estrutural, mas também os limites de deformação aceitáveis para garantir uma utilização adequada.

Além disso, foi possível caracterizar a estrutura, comparar modelos analíticos com um caso real e estreitar o conhecimento acadêmico e as práticas construtivas. A análise experimental proporcionou uma visão mais realista do comportamento das lajes pré-moldadas e possibilitou a identificação de pontos que podem ser aprimorados em pesquisas futuras, especialmente no que diz respeito à previsão da carga última e ao desempenho estrutural ao longo do tempo.

A utilização do cimento CP V ARI mostrou-se adequada para a execução do experimento, principalmente em função da elevada resistência inicial proporcionada por esse material, favorecendo o desenvolvimento mecânico do concreto durante o período de cura adotado. Os resultados obtidos indicaram comportamento estrutural compatível com estudos experimentais semelhantes disponíveis na literatura, especialmente quanto ao caráter conservador das previsões teóricas em relação à carga última de ruptura. Além disso, observou-se que o sistema apresentou elevada capacidade resistente mesmo utilizando uma configuração construtiva comercial usualmente empregada na região estudada.

Diante dessas observações, conclui-se que as lajes pré-moldadas são uma solução eficiente e segura para edificações de pequeno e médio porte. No entanto, para aplicações sujeitas a carregamentos permanentes ou de longa duração, é essencial aprofundar os estudos sobre seu comportamento estrutural. Além disso, a adoção de boas práticas construtivas e o cumprimento rigoroso das normas técnicas são fundamentais para assegurar a qualidade e a segurança desse sistema na construção civil.

5. Agradecimentos

Agradeço aos profissionais e à equipe da empresa Pré-Moldados Líder, representada por Tadeu Teixeira da Rocha, que gentilmente forneceu o espaço físico e os materiais necessários para a realização do ensaio de carga. A infraestrutura e o apoio fornecidos foram fundamentais para o sucesso desta pesquisa, permitindo a obtenção dos dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Ao CEFET MG, pela disponibilização do

laboratório de ensaios mecânicos e construção civil para caracterização dos materiais.

Referências

Abecassis, M.C., Sanches, A.E., Castilho, J.G.F. and Pinheiro, É.C.N.M., 2022. *Laje pré-moldada e suas vantagens em uma obra de construção civil: estudo de caso*. Brazilian Journal of Development, 8(10). <https://doi.org/10.34117/bjdv8n10-231>

Al-Issawi, A.S., Alshareef, N.H. and Al-Ameeri, A.S., 2023. *Waffle, ribbed and composite joists slabs: A review study*. Construction Technologies and Architecture, 8, pp.31–41. <https://doi.org/10.4028/p-8b9MJ9>

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2007. *NBR 15522: Laje pré-fabricada – avaliação do desempenho de vigotas e pré-lajes sob carga de trabalho*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2007. *NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – especificação*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2015. *NBR 5738: Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2015. *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2016. *NBR 14859: Lajes pré-fabricadas de concreto – Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis – requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2017. *NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2019. *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro: ABNT.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2023. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Brasil – República Federativa do Brasil, 2024. *Programa Minha Casa Minha Vida*. Ministério das Cidades. Available at: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/materias/programa-minha-casa-minha-vida>> [Accessed 16 January 2025].
- Caixeta, J.P.G. and Hannum, M.M., 2018. *Dimensionamento de lajes pré-moldadas do tipo vigota em concreto armado e concreto protendido*. Graduação. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil. [Accessed 16 January 2025].
- Chen, X., Liu, Y., Ma, Q., Wu, D. and Shi, G., 2025. *Study on the method for calculating the flexural rigidity of reinforced concrete truss hollow composite slabs*. *Buildings*, 15(4), p.586. <https://doi.org/10.3390/buildings15040586>
- Damasceno, D.R., 2022. *Análise experimental de lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas*. Graduação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil. [Accessed 12 April 2026].
- El Debs, M.K., 2017. *Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Hübner, F.E., 2023. *Determinação da influência da espessura da capa de concreto armado complementar na distribuição transversal de cargas lineares aplicadas longitudinalmente às nervuras em lajes pré-fabricadas unidirecionais de vigotas protendidas*. Graduação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil. [Accessed 18 January 2025].
- Kaspary, J., Ehrenbring, H.Z., Pacheco, F., Christ, R., Quinino, U.C.M. and Tutikian, B.F., 2022. *Theoretical and experimental analysis of precast slabs composed of pre-stressed joists*. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 27(3). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0136>
- Kimura, A., 2018. *Informática aplicada a estruturas de concreto armado*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Leão, A.P.S., Jesus, A.F., Araújo, A.R.N., Silva, C.A.V., Silva, C.M.L., Ferreira, G.S., Silva, W.D.M. and Santos, W.T.S., 2024. *Estudo comparativo entre lajes treliçadas pré-moldadas e lajes maciças*. *Revista Foco*, 17(4), p. e4676. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n4-125>
- Maheri, M.R., Nariman, A., Takaloozadeh, M. and Etemadi, M., 2025. *Performance of different types of prestressed and ordinary single RC joist-slab systems subjected to shear and bending loads*. *Engineering Structures*, 328, p.119756. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119756>
- Mahmoud, T.K. and Al-Quraishy, Q.A.H., 2012. *Experimental and theoretical investigations for behavior of precast concrete girders with connections*. *Journal of Engineering*, 18(5), pp.621–638. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2012.05.07>
- Maronez, L.F., 2022. *Soluções para o dimensionamento de lajes nervuradas unidirecionais pré-moldadas treliçadas contínuas*. Graduação. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. [Accessed 18 January 2025].
- Martins, L.K.A., Silva, K.G., Costa, E.B., Valim, M.S.V., Silva, E.M.D. and Souza, C.R., 2023. *Descrição do processo executivo de laje nervurada em um prédio de múltiplos pavimentos*. *Revista Sociedade Científica*, 6(1), pp. 452–477. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8183875>
- Nascimento, J.C.G., 2022. *Estudo comparativo entre lajes pré-moldadas e lajes convencionais*. Graduação. Universidade Norte do Paraná, Ponta Grossa, Brasil. [Accessed 12 May 2026].
- Nascimento, W.S., 2021. *Avaliação do método construtivo das vigotas para lajes pré-moldadas na cidade de Ipanema-MG*. Graduação. Centro Universitário UNIFACIG, Manhuaçu, Brasil. [Accessed 28 January 2025].
- Nepomuceno, M.H.R., 2022. *Análise estrutural de lajes nervuradas segundo prescrições de norma e métodos numéricos*. Graduação. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. [Accessed 12 April 2026].

Porto, T.B. and Fernandes, D.S.G., 2015. *Curso básico de concreto armado*. São Paulo: Oficina de Textos.

Silva, C.S., 2025. *Análise comparativa entre projetos residenciais com laje maciça e pré-moldada: impacto no dimensionamento estrutural e no volume de concreto e aço*. Graduação. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil. [Accessed 12 May 2026].

Wang, H., Marino, E.M., Pan, P., Liu, H. and Nie, X., 2018. *Experimental study of a novel precast prestressed reinforced concrete beam-to-column joint*. *Engineering Structures*, 156, pp.68–81. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.011>

Zhang, A., Tao, L., Zhou, G., Li, X., Zhang, Y. and Su, M., 2024. *Experimental study on the load-bearing capacity of detachable prefabricated concrete slabs with dislocated cover slab units for steel structures*. *Structures*, 59, p.105692. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105692>