

**Prova de carga em lajes maciças****Análise numérica e experimental****Load test on solid slabs****Numerical and experimental analysis***Rodrigo Gustavo Delalibera<sup>1\*</sup>**Cristiane Pires<sup>2</sup>**Gercindo Ferreira<sup>3</sup>**Igor Varga de Oliveira<sup>4</sup>*

Recebido: jul.2020 | Aceito: fev.2021

**Resumo**

Em situações em que ocorre mudança do uso da edificação ou em situações que surgem falhas construtivas, faz-se necessário comprovar a segurança estrutural dos elementos estruturais e para isso, frequentemente, realizam-se ensaios experimentais, denominados de provas de carga. Neste artigo, apresentaram-se os ensaios de prova de carga estática de três lajes maciças com intuito de verificar a segurança estrutural no estado limite último e no estado limite de serviço. Para a análise numérica, utilizou-se um programa de computador baseado no método dos elementos finitos, considerado o comportamento dos materiais elásticos e lineares. Concluiu-se que os elementos estruturais analisados apresentaram capacidade resistente e a simulação numérica resultados satisfatórios.

**Palavras-chave:** lajes maciças, concreto armado, prova de carga, análise experimental, análise numérica.

**Abstract**

In situations where there is a change in the use of the building or in situations that arise in construction failures, it is necessary to prove the structural safety of the structural elements and for this, experimental tests, often called load tests, are often carried out. In this paper, the static load tests of three slabs were presented to verify the structural safety in the ultimate limit state and in the service limit state. For numerical analysis, a computer program based on the finite element method was used, considering the behavior of elastic and linear materials. It was concluded that the structural elements analyzed showed strength capacity and the numerical simulation had satisfactory results.

**Keywords:** slabs, reinforcement concrete, load test, experimental analysis, numerical analysis.

<sup>1,2,3,4</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG

\*Professor da Faculdade de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, delalibera@ufu.br

## INTRODUÇÃO

Atendendo à solicitação de uma empresa, a equipe da FECIV – Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia - UFU, composta pelos servidores Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera, Téc. Cristiane Pires, discente do curso de Engenharia Civil, Igor Vargas de Oliveira, e o Eng. Ms. Gercindo Ferreira, realizou ensaios estáticos de prova de carga em lajes de concreto armado. Os ensaios foram necessários, pois durante a fase de moldagem do concreto das lajes, ocorreram problemas construtivos, provocando fissuras junto à face inferior das mesmas. Tais fissuras poderiam afetar a segurança estrutural das lajes, como também, comprometer sua utilização, quando em serviço.

Os ensaios foram realizados durante o período de 16 de junho de 2020 a 22 de junho do mesmo ano. As lajes ensaiadas foram definidas pelo pessoal técnico da empresa, sendo elas: lajes L1, L4 e L7, localizadas no primeiro pavimento de uma edificação de quatro pavimentos, composta por paredes e lajes de concreto armado, com área edificada total de 177,12 m<sup>2</sup>, localizada na cidade de Uberlândia – MG.

Para a realização das análises, foram solicitados documentos que serviram de embasamento para as premissas teóricas. Foram apresentados os seguintes documentos: laudo de controle tecnológico do concreto (ensaios de compressão); rastreabilidade do concreto vinculados às notas fiscais dos mesmos; e projetos de arquitetura e estrutural.

Para a realização dos ensaios utilizaram-se as seguintes normas: NBR 6118:2014, NBR 9607:2019 e NBR 6120:2019 e também foram consultadas as recomendações do código americano ACI 318:2019 e as diretrizes apresentadas por DE OLIVEIRA et al. (2007).

As provas de carga são utilizadas em situações em que há um erro ou um vício construtivo, causando problemas estruturais em determinados elementos. A melhor maneira de aferir a segurança de um elemento estrutural é a realização de uma prova de carga.

Nesse artigo, apresenta-se um estudo de caso, onde foi realizado prova de cargas em lajes maciças.

## METODOLOGIA

Trata-se de uma metodologia experimental e numérica. Primeiramente definiram-se os pontos de medição e a determinaram-se as lâminas de água para simular o carregamento. Após fez-se uma análise comparativa dos resultados por meio de uma simulação numérica, onde utilizou-se um programa de computador com formulação com elementos finitos de placa.

De acordo com a NBR 9607:2019, para estruturas de edificações o carregamento que defini o Estado Limite Último é determinado por meio da Equação 01.

$$P_{\text{ensaio}} = 0,85 \cdot [1,35 \cdot (G - G_0) + 1,5 \cdot Q] - G_1 \quad (1)$$

Sendo:  $G = G_0 + G_1 + G_2$ , onde:

- G: representa as ações permanentes totais;
- $P_{\text{ensaio}}$ : é a carga a ser aplicada na prova de carga;
- $G_0$ : representa as ações permanentes em função do peso próprio;
- $G_1$ : representa as ações permanentes atuantes no momento do ensaio, exceto o peso próprio;

- $G_2$ : representa as ações permanentes adicionais, previstas ao longo da vida útil da estrutura;
- $Q$ : representa as ações variáveis previstas ao longo da vida útil da estrutura.

## ENSAIO

No projeto arquitetônico e estrutural, as espessuras das paredes e das lajes tinham 10 cm e foram essas as consideradas nas análises contidas neste trabalho. Ressalta-se, que as espessuras das paredes e das lajes não foram aferidas no local, pois não foi feita extração de corpos-de-prova (testemunhos).

A Figura 1 mostra a planta de formas do primeiro pavimento de um dos blocos edificados. A Figura 2, mostra um detalhe das lajes ensaiadas e a posição das “piscinas”.

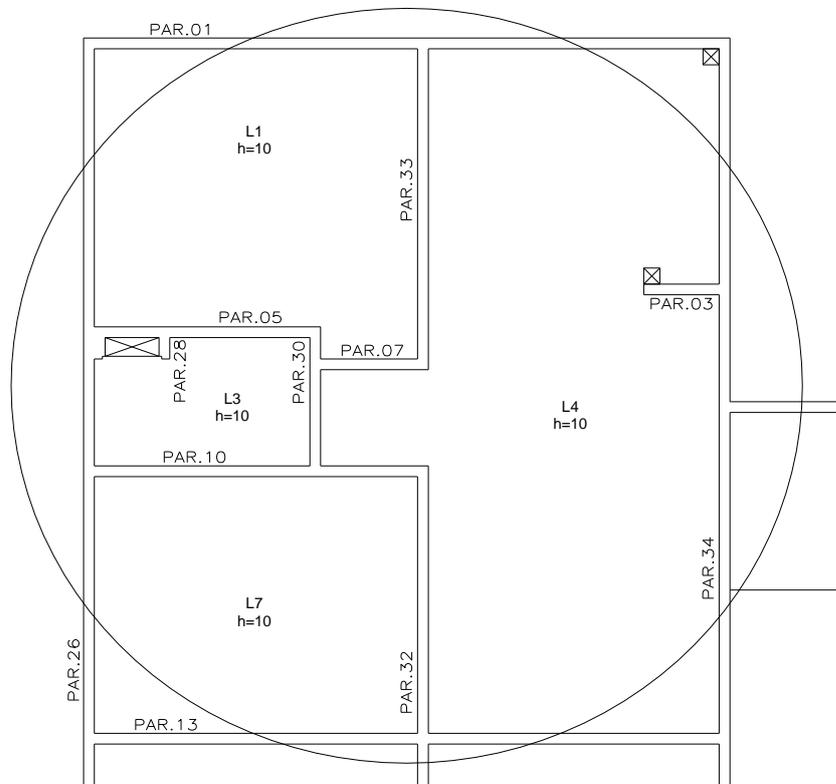


Figura 1 – Planta de formas, primeiro pavimento

Para a obtenção dos deslocamentos verticais foram instalados dois relógios comparadores de deslocamentos, um eletrônico (LVDT, com leitura de 0,001m) e outro analítico (RC, com leitura de 0,001m), aproximadamente no mesmo local da laje. Tais relógios foram posicionados no centro geométrico das lajes, como mostrado por meio da Figura 3. A aquisição de dados do equipamento LVDT foi realizada de maneira automática e do RC manualmente.

O carregamento foi aplicado por meio de lâminas de água sobre as lajes. Para garantir a estanqueidade das lajes, foram instaladas lonas de material polimérico, criando “piscinas”, como mostrado por meio da Figura 4.

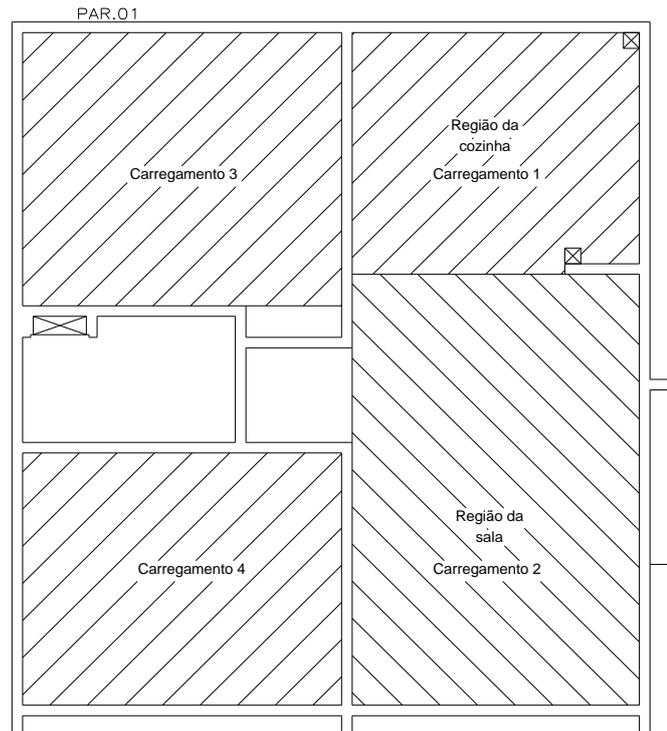
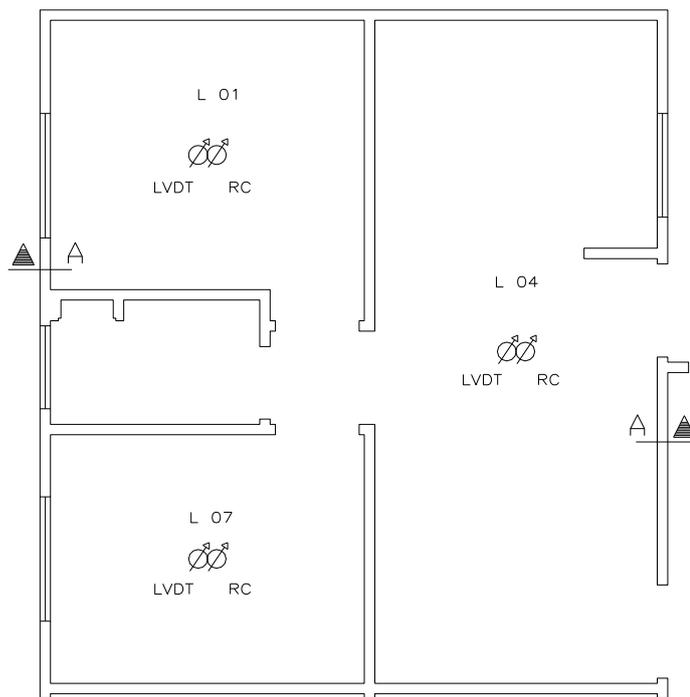


Figura 2 – Detalhe das lajes ensaiadas



Croqui - planta



Corte - AA

Figura 3 – Posição dos relógios comparadores

A água foi colocada por meio de uma bomba hidráulica acoplada num caminhão tipo Pipa e a vazão controlada por medidas das espessuras das lâminas de água.

O carregamento foi aplicado em duas etapas, sendo a primeira por uma lâmina de água sobre a laje, caracterizando o Estado Limite Último, o segundo por meio de uma lâmina de água relativa ao Estado Limite de Serviço de Deformação Excessiva. Tais estados limites são definidos na NBR 6118:2014. A definição da espessura da lâmina de água relativa ao Estado Limite Último foi baseada nas recomendações da NBR 9607:2019.



Figura 4 – Revestimento com lona polimérica sobre a laje

O Figura 5 mostra uma foto dos equipamentos de medição utilizados para a obtenção dos deslocamentos verticais nas lajes.



LVDT (transdutor de medição de deslocamento linear) e RC (Relógio comparador).



Sistema de aquisição de dados

Figura 5 – Equipamentos de medição

A seguir é descrito o histórico da realização do ensaio. Observa-se que as lajes não apresentavam flecha inicial.

- Carregamento da Laje L4, na região na cozinha com lâmina de água igual a 20,5 cm (Estado Limite Último);
- Carregamento da Laje L4, na região da sala de estar com lâmina de água igual a 27 cm (Estado Limite Último);
- Descarregamento da Laje L4, região da cozinha até a lâmina de água de 4,5 cm (Estado Limite de Serviço);
- Descarregamento da Laje L4, região da sala de estar, até a lâmina de água de 11 cm (Estado Limite de Serviço);
- Descarregamento total da Laje L4;
- Carregamento da Laje L1 com lâmina de água igual a 27 cm;
- Carregamento da Laje L7 com lâmina de água igual a 27 cm;
- Descarregamento da Laje L1 com lâmina de água até 11,5 cm;
- Descarregamento da Laje L7 com lâmina de água até 11,5 cm;
- Descarregamento total das Lajes L1 e L7.

Ressalta-se que às lâminas de água, representam os carregamentos em função da combinação quase-permanente e da combinação última normal, como descrito anteriormente.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Laje L1

Na Laje L1, apenas existiam as ações permanentes relativas ao peso próprio  $G_0$ , sendo assim, e considerando as informações fornecidas pela empresa, consideraram-se as demais ações permanentes com valor igual a  $0,63 \text{ kN/m}^2$ , além da ação acidental considerada no projeto estrutural original e na NBR 6120:2019, com valor igual a  $1,5 \text{ kN/m}^2$ . Para essas ações, o valor da ação a ser considerada no ensaio de prova de carga foi igual a  $2,709 \text{ kN/m}^2$  e considerando a Equação 01, determinou-se a lâmina de água igual a 27 cm. A Figura 6 mostra um gráfico força vs. deslocamento relativo ao ensaio da Laje L1.

Após o carregamento total, retirou-se parte da água, restando no reservatório uma lâmina com altura igual a 11,5 cm. Tal ação representa o carregamento relativo ao Estado Limite de Serviço na combinação Quase Permanente, em que o coeficiente  $\psi_2$ , relativo à redução da ação acidental, quando em serviço, teve valor igual a 0,3.

A laje não apresentou fissuras. Na Figura 6 e nas Figuras 7 e 8, os carregamentos são relativos às lâminas de água. Observa-se também, que se retirou parte da água, até atingir uma lâmina que representasse um carregamento relativo ao estado limite de serviço, utilizando-se a combinação quase-permanente.

### Laje L4

O carregamento da laje L4 foi dividido em dois, pois parte do revestimento do piso (região da cozinha, ver Figura 2) encontrava-se instalado. Na região da cozinha, além do peso próprio, existe a ação permanente aplicada ( $G_1$ ) com valor igual a  $0,757 \text{ kN/m}^2$ . Portanto, a ação de ensaio, obtida por meio da Equação 01, foi igual a  $2,20 \text{ kN/m}^2$ , resultando uma lâmina de água igual a 20,2 cm.

Na região da sala de estar, a ação permanente existente foi apenas a ação do peso próprio da laje. Sendo assim, a carga de ensaio teve valor igual a  $2,709 \text{ kN/m}^2$ , representando uma lâmina de água igual a 27 cm.

Na região da cozinha, a lâmina de água relativa ao Estado Limite de Serviço foi igual a 4,5 cm, enquanto na região da sala, essa lâmina foi igual a 11,5 cm.

A Figura 7 mostra a curva força vs. deslocamento relativo ao Estado Limite Último, na região da cozinha e o descarregamento referente ao Estado Limite de Serviço de Deslocamento Excessivo.

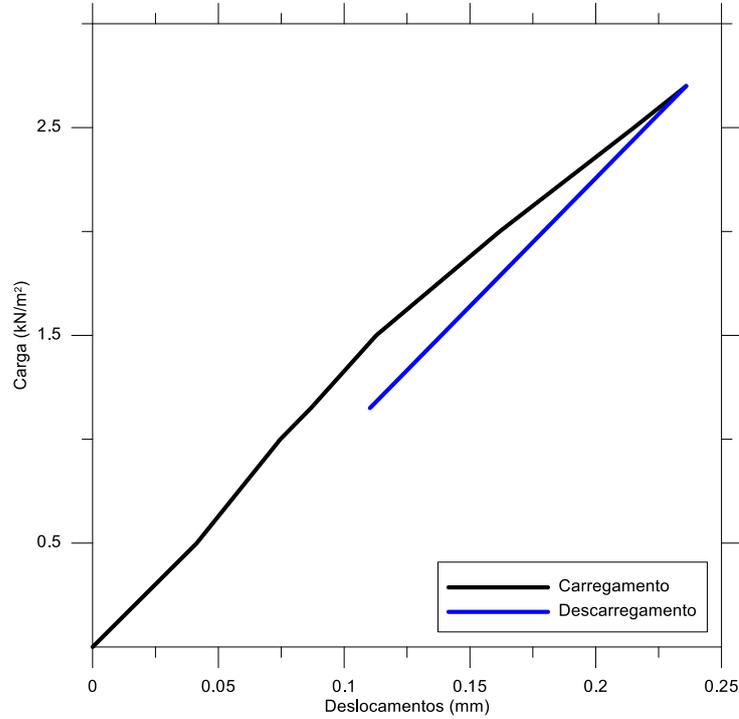


Figura 6 – Força vs. Deslocamento, Laje L1

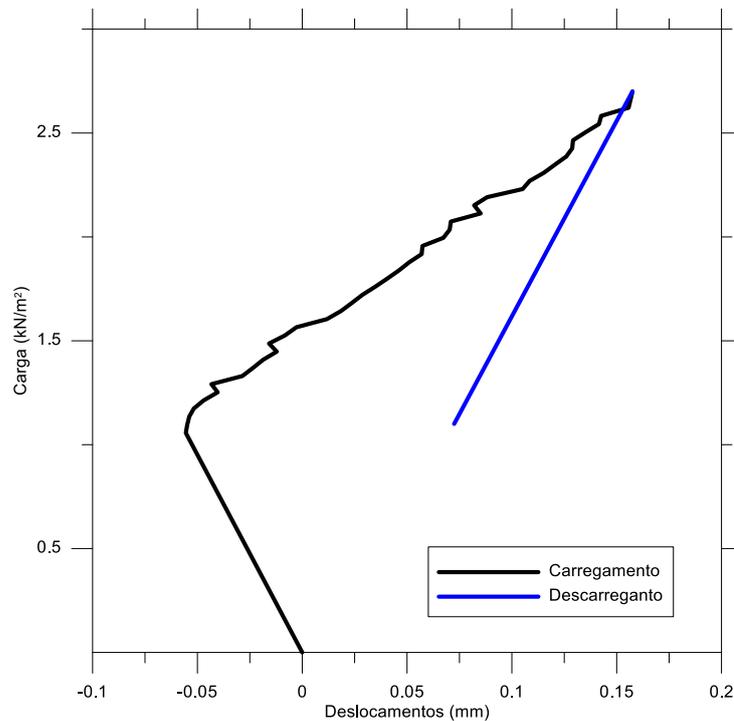


Figura 7 – Força vs. Deslocamento, Laje L4

Observa-se por meio da Figura 7, que o início do carregamento na região da cozinha provocou um deslocamento negativo na laje L4. Isso era esperado, pois os equipamentos de medicação foram instalados na região central da laje.

### Laje L7

O carregamento da laje L7 foi o mesmo da laje L1, contudo os deslocamentos obtidos foram diferentes em função das condições de contorno (vinculações) também serem diferentes.

A Figura 8 mostra a curva força vs. deslocamento da laje L7, relativa ao Estado Limite Último e ao Estado Limite de Serviço.

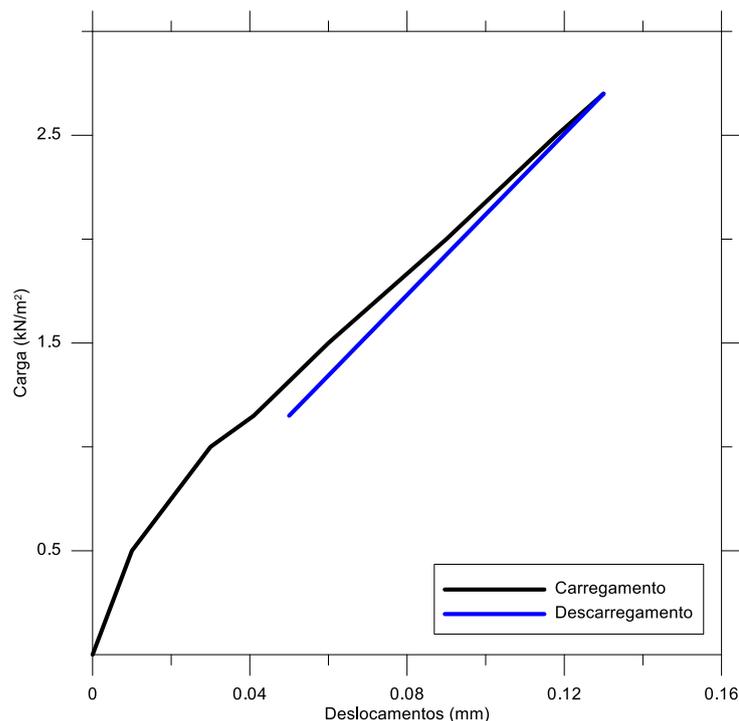


Figura 8 – Força vs. Deslocamento, Laje L7

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos projetos de arquitetura, estrutural e nos laudos de controle tecnológico do concreto, procedeu-se uma análise numérica complementar às provas de carga, com intuito de aferir e extrapolar os resultados, considerando-se os efeitos da fluência no material concreto.

De acordo com relatório de rastreamento da moldagem do concreto, a data da concretagem foi no dia 12 de setembro de 2019, tendo o concreto as seguintes propriedades: ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) igual a 245 mm e adicional de 30 litros de água no ato do lançamento do concreto; A resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, foi igual a 29,2 MPa, ressaltando-se que foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e altura da geratriz igual a 20 cm. Considerando o efeito de escala dos corpos-de-prova, a resistência do concreto utilizada nas análises foi: 28,3 MPa.

Não foram realizados ensaios de controle tecnológico do concreto para a comprovação da resistência a tração, sendo assim, a mesma foi determinada por meio das recomendações da

NBR 6118:2014, considerando-se a resistência no quantil inferior, a qual teve valor igual a 1,95 MPa.

O módulo de elasticidade secante do concreto também foi determinado por meio das recomendações da NBR 6118:2014, considerando-se agregado graúdo tipo basalto, que é o tipo de agregado graúdo disponível na região para a produção de concreto. Portanto, valor do módulo de elasticidade secante do concreto foi igual a 31128 MPa.

As idades dos concretos, foram fornecidas pela empresa, por meio do controle de rastreabilidade do concreto e das datas das notas fiscais.

A Tabela 01 mostra um resumo das propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do concreto.

$f_c$ (MPa)	$f_c^*$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)	$E_{cs}$ (MPa)
29,2	28,3	1,95	31128

$f_c$ , resistência à compressão do concreto;

$f_c^*$ , resistência à compressão corrigida do concreto;

$f_{ct}$ , resistência à tração do concreto;

$E_{cs}$ , módulo de elasticidade secante do concreto.

Considerando as recomendações da NBR 6118:2014, item 17.3.1, determinou-se o momento de fissuração, que por definição é o momento fletor que origina a primeira fissura mecânica nos elementos estruturais submetidos à flexão simples. Para o caso em análise, trata-se do momento de fissuração das lajes. Como as lajes são todas maciças, com mesma espessura e mesma resistência do concreto, o momento de fissuração foi o mesmo, cuja o valor foi igual a: 12,19 kNm. Ressalta-se que o momento de fissuração foi determinado utilizando-se a idade do concreto na data do ensaio.

### Simulação Numérica

Para a simulação numérica, utilizou-se um programa de computador com formulações em elementos finitos, utilizando-se para a simulação das lajes elementos de placa quadriláteros.

As paredes foram modeladas como apoios indeslocáveis, permitido rotação dos nós. Os carregamentos foram aplicados por meio de pressão nos elementos, de acordo com a sequência de ensaios descrita. Os materiais foram considerados com comportamento elástico e linear.

A Figura 8 mostra os elementos de placa e as condições de contorno aplicadas no pavimento. Para a simulação numérica, utilizou-se o programa de computador Strap<sup>®</sup>, elementos finitos de placa (considerando-se apenas deformações provocadas por momento fletor) e malha quadrada com dimensões de 50 cm de lado. Considerou-se comportamento elástico e linear para o concreto, pois os momentos atuantes foram inferiores ao momento de fissuração.

A Figura 9 apresenta os esforços internos de momento fletor, relativo a uma das combinações de carregamento utilizadas. Na Figura 9, os valores negativos referem-se aos momentos positivos e os valores positivos referem-se aos momentos negativos.

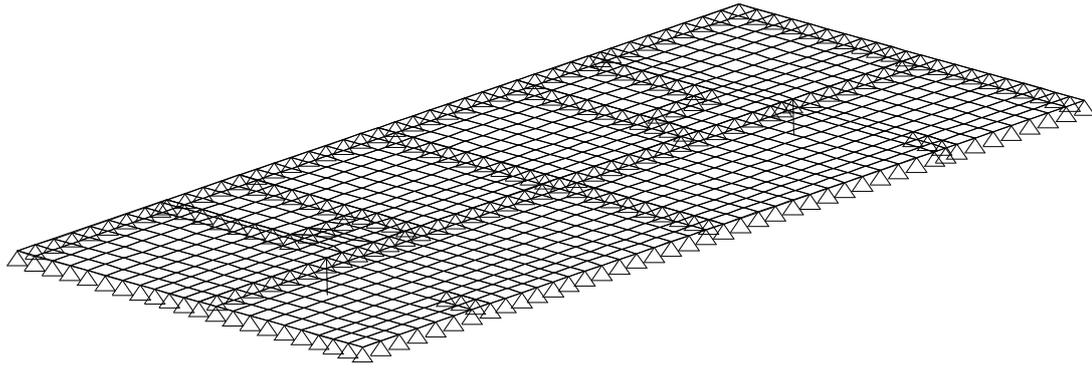


Figura 8 – Discretização do pavimento

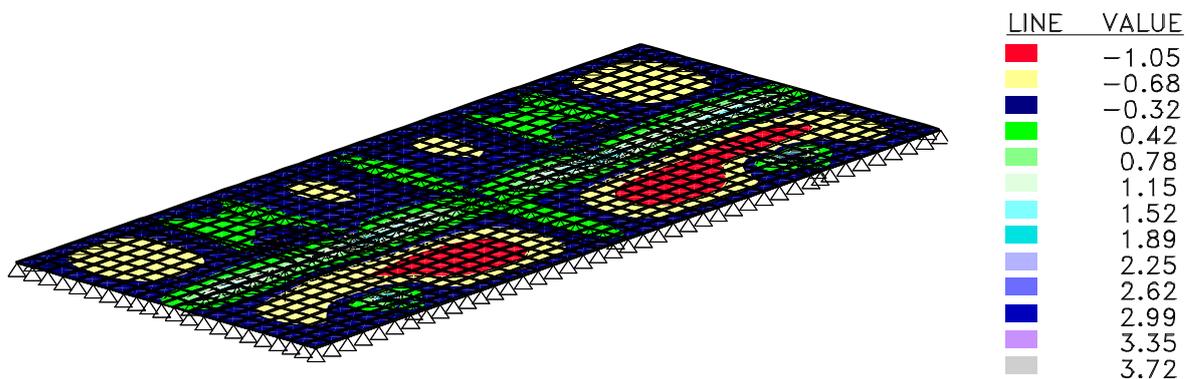


Figura 9 – Momentos fletores na direção X, unidades: kN·m

A Tabela 2 mostra os valores dos máximos momentos fletores positivos e negativos obtidos na simulação numérica, considerando as seguintes combinações de carregamentos:

- Comb. 1: Ações permanentes;
- Comb. 2: Carregamento da Laje L4, região da cozinha, lâmina de 20,5 cm;
- Comb. 3: Carregamento da Laje L4, região da sala de estar, lâmina igual a 27 cm;
- Comb. 4: Descarregamento da Laje L4, região da cozinha até a lâmina de água de 4,5 cm (Estado Limite de Serviço);
- Comb. 5: Descarregamento da Laje L4, região da sala de estar, até a lâmina de água de 11 cm (Estado Limite de Serviço);
- Comb. 6: Carregamento da Laje L1 com lâmina de água igual a 27 cm;
- Comb. 7: Carregamento da Laje L7 com lâmina de água igual a 27 cm;
- Comb. 8: Descarregamento da Laje L1 com lâmina de água até 11,5 cm (Estado Limite de Serviço);
- Comb. 9: Descarregamento da Laje L7 com lâmina de água até 11,5 cm (Estado Limite de Serviço);

O eixo x foi considerando na direção horizontal e o eixo Y na direção vertical.

Com base nos resultados descritos na Tabela 2, observa-se que o momento que provocaria a primeira fissura teve valor maior do que os valores dos momentos fletores de todas as combinações de carregamento consideradas. Desta forma, pode-se afirmar que as lajes do pavimento têm seu comportamento caracterizado por Estádio I, ou seja, sem fissuras provocadas por ações mecânicas.

Observa-se por meio dos resultados da Tabela 2, que os máximos momentos foram menores que o momento de fissuração, portanto, não foi necessário a consideração da plastificação do concreto na simulação numérica. O momento  $M_x$  gira em torno do eixo x, que foi considerado na direção horizontal e o  $M_y$  gira em torno do eixo y, adotado na direção vertical.

Na Tabela 3 apresentam-se os deslocamentos obtidos pela simulação numérica, no mesmo ponto do ensaio experimental. Observa-se que nenhuma das lajes apresentou momento maior que o momento de fissuração, portanto, sem fissuras.

Tabela 2 – Momentos fletores máximos no pavimento (positivos e negativos).

<b>Combinações</b>	<b><math>M_{x,pos}</math> (kNm)</b>	<b><math>M_{x,neg}</math> (kNm)</b>	<b><math>M_{y,pos}</math> (kNm)</b>	<b><math>M_{y,neg}</math> (kNm)</b>
Comb. 1	1,05	3,72	0,82	3,66
Comb. 2	1,35	4,85	1,23	4,78
Comb. 3	2,14	6,54	2,03	6,57
Comb. 4	1,12	3,97	0,83	3,91
Comb. 5	1,47	4,67	1,32	4,65
Comb. 6	1,28	3,43	1,54	3,43
Comb. 7	1,05	3,70	1,25	3,64
Comb. 8	1,02	3,60	1,03	3,57
Comb. 9	1,02	3,59	1,03	3,56

Tabela 3 – Deslocamentos

<b>Combinações</b>	<b>Laje L4 (mm)</b>	<b>Laje L1 (mm)</b>	<b>Laje L7 (mm)</b>
Comb. 1	0,158	0,158	0,088
Comb. 2	0,164	0,146	0,091
Comb. 3	0,345	0,192	0,115
Comb. 4	0,157	0,139	0,087
Comb. 5	0,236	0,157	0,079
Comb. 6	0,151	0,326	0,126
Comb. 7	0,228	0,329	0,228
Comb. 8	0,158	0,228	0,088
Comb. 9	0,154	0,222	0,137

### Simulação numérica vs. Análise experimental

A tabela 4 mostra os deslocamentos relativos ao ensaio experimental e à simulação numérica. Os deslocamentos relativos da simulação numérica apresentados na Tabela 4 foram obtidos por meio da Tabela 03, descontando-se os deslocamentos relativos às ações permanentes – Comb. 01.

Observa-se por meio da Tabela 04, boa correção entre os resultados experimentais e numéricos.

Tabela 4 – Deslocamentos relativos

Lajes	$\delta_{Exp. ELU}$ (mm)	$\delta_{Exp. ELS}$ (mm)	$\delta_{Num. ELU}$ (mm)	$\delta_{Num. ELS}$ (mm)	$\delta_{Exp} / \delta_{Num}$ E.L.U.	$\delta_{Exp} / \delta_{Num}$ E.L.S.
L1	0,236	0,069	0,168	0,070	1,40	0,99
L4	0,158	0,0725	0,187	0,078	0,85	0,93
L7	0,131	0,051	0,140	0,049	0,77	1,04

Na Tabela 04, tem-se:

- $\delta_{Exp.ELU}$ , deslocamento experimental no Estado Limite Último;
- $\delta_{Exp.ELS}$ , deslocamento experimental no Estado Limite de Serviço;
- $\delta_{Num.ELU}$ , deslocamento numérico no Estado Limite Último;
- $\delta_{Num.ELS}$ , deslocamento numérico no Estado Limite de Serviço.

### Consideração do efeito da fluência

A data da moldagem das lajes, como já foi mencionado, ocorreu no dia 12 de setembro de 2019 e os ensaios foram realizados entre dos dias 16 e 19 de junho de 2020, provocando um tempo de carregamento das ações permanentes de aproximadamente nove meses.

O coeficiente de fluência foi determinado, com base nas recomendações da NBR 6118:2014, para um tempo maior que setenta meses, tempo o qual ocorre a estabilização dos efeitos provocados pela fluência

Na Tabela 5 mostram-se os deslocamentos finais, após o efeito da fluência.

Tabela 5 – Deslocamentos finais no estado limite de serviço de deformação excessiva

Lajes	$\delta_{Exp. ELS}$ (mm)	$\alpha_f$	$\delta_{Exp. final}$ (mm)	$\delta_{limite}$ (mm)	$\delta_{Num. ELS, total}$ (mm)	$\delta_{Num. ELS, total, final}$ (mm)	Situação
L1	0,069	0,70	0,117	12,24	0,232	0,395	Atende
L4	0,0725	0,70	0,123	11,04	0,335	0,569	Atende
L7	0,051	0,70	0,087	12,24	0,129	0,219	Atende

Na Tabela 5 tem-se:

- $\delta_{Exp.ELS}$ , deslocamento experimental no Estado Limite de Serviço;
- $\delta_{Exp.final}$ , deslocamento experimental no Estado Limite de Serviço, considerando o efeito da fluência;
- $\delta_{Num.ELS,total}$ , deslocamento numérico (considerando as ações permanentes) no Estado Limite de Serviço;
- $\delta_{Num.ELS,total,final}$ , deslocamento numérico (considerando as ações permanentes) no Estado Limite de Serviço, considerando o efeito da fluência;
- $\alpha_f$ , coeficiente de fluência.

Com base nos resultados exibidos na Tabela 5, verifica-se que o Estado Limite de Serviço de Deformação Excessiva foi atendido, pois as lajes ensaiadas não atingiram o deslocamento limite expresso pela NBR 6118:2014.

## CONCLUSÃO

Após realizadas as análises experimentais e numéricas, pode-se concluir que as lajes ensaiadas atenderam ao Estado Limite Último e ao Estado Limite de Serviço de Deformação Excessiva. Desta forma, os elementos estruturais analisados, não apresentarão ruptura, desde que as cargas não sejam aumentadas, além das previstas no projeto estrutural.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e a Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M – Building code requirements for reinforced concrete. Detroit, USA, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 69607:2019 – Prova de carga estática em estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- OLIVEIRA, C. R.; MORENO JÚNIOR, A. L. Considerações sobre prova de carga e estruturas de concreto. Revista Escola de Minas, 2007.