

Análise Estrutural de Pisos de Concreto Apoiados Sobre Lajes de Concreto Armado Via Método dos Elementos Finitos

Renan Gustavo Pacheco Soares¹, Romilde Almeida de Oliveira², Arnaldo Manoel Pereira Carneiro³

¹Universidade Federal de Pernambuco / CTG / Email: renangpsoares@hotmail.com

²Universidade Católica de Pernambuco / UNICAP / Email: romildealmeida@gmail.com

³Universidade Federal de Pernambuco / CTG / Email: arnaldo2164@hotmail.com

Resumo

Nas últimas décadas, tem sido observado um aumento dos fenômenos patológicos em pisos de concreto de obras situadas no estado de Pernambuco. Desse modo, este trabalho teve como objetivo caracterizar a performance e identificar os principais fatores que contribuem para a fissuração de placa em pisos de concreto apoiados sobre lajes de concreto armado, através de análise numérica. Foi utilizada uma ferramenta de auxílio computacional que faz uso do Método dos Elementos Finitos para análises não lineares. As variáveis analisadas foram a concentração de tensões nas bordas das placas e deflexões máximas na estrutura do piso de concreto, em função da variação do módulo de deformação longitudinal e do coeficiente de fricção na região de contato das placas. Os resultados permitiram caracterizar o comportamento estrutural do sistema estrutural e sua influência no surgimento dos problemas de fissuração em pisos de concreto. Foi verificado um problema de fluxo de cisalhamento em função da má aderência na região de contato entre as placas. Também foi constatado que o problema de fissuração não está relacionado com o momento resistente na borda da placa, mas pelo efeito do empenamento. Constatou-se ainda que a laje maciça possui melhor desempenho estrutural como sub-base quando comparada com uma laje nervurada, aproximadamente 40%. Além disso, foi estabelecida uma recomendação para minimizar o problema de fluxo de cisalhamento na etapa de projeto, pela inserção de barras rígidas na região de contato entre as placas.

Palavras-chave

Piso de concreto; fissuração; lajes; elementos finitos.

Introdução

Uma das aplicações do concreto que tem atraído os construtores é o piso de concreto. Sua boa performance funcional frente a estados de carregamento estáticos e dinâmicos, redução de tempo e praticidade executiva fizeram com que o piso de concreto se tornasse o principal revestimento no âmbito industrial. Não obstante, também é possível constatar sua aplicação em armazéns, centros logísticos, shopping centers, edifícios garagem, edificações comerciais e residenciais (LOPRENCIPE; CANTISANI, 2015). Para um sistema de piso de concreto polido livre de patologias, variáveis devem ser consideradas. O *American Concrete Institute* (ACI) em seu *Guide for concrete floor and*

slabs construction – ACI 302.1R-96, recomenda diversos aspectos para evitar o surgimento de patologias. Dentre as principais, estão as considerações iniciais de projeto, sistema estrutural em função do estado de carregamento, elementos constituintes, propriedades e consistência das misturas de concreto, transporte, aplicação, juntas, acabamento, cura, proteção e manutenção.

No caso de algumas das recomendações não serem atendidas, o elemento estrutural estará sujeito a problemas de ordens diversas. Em pisos de concreto, os principais problemas que podem ser identificados são a fissuração, o rompimento da placa de concreto, delaminação, empenamento das bordas, umidade ascendente, esborcinamento das juntas de dilatação e o desgaste por abrasão (ACI 302.1R, 1996).

Manifestações patológicas como a fissuração e o rompimento da placa de concreto tem sido recorrente nos pisos de concreto de diversas obras situadas no Agreste Pernambucano. Além de problemas de ordem estrutural e da necessidade de interrupção parcial ou total das atividades fins, os custos de reparo e manutenção dos pisos têm se mostrado elevados (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Obras de médio e grande porte que têm apresentado problemas de fissuração com rompimento da placa dos pisos de concreto, demandam extensa logística e procedimentos tecnológicos adequados para a solução dos problemas patológicos. Logo, indicadores que promovam o desenvolvimento de projetos sólidos nos aspectos de qualidade, durabilidade, segurança, bem como a harmonização com as perspectivas de sustentabilidade, precisam ser instituídos de modo emergencial para que se possa elevar o índice de confiabilidade desse tipo de sistema construtivo.

Em adição, atualmente há uma série de carências de pesquisas nessa área, como a necessidade de caracterização do comportamento das placas de concreto apoiadas em base elástica quando sujeitas a carregamentos estáticos e dinâmicos e a importância na identificação das principais causas que geram problemas patológicos referentes aos pisos de concreto que tem como sub-base elementos de placa em concreto armado, como lajes maciças e nervuradas.

Nesse cenário, o presente estudo teve como foco proceder uma análise via Método dos Elementos Finitos (MEF) com o auxílio de uma ferramenta computacional, o ANSYS®, em piso de concreto que tem como sub-base lajes em concreto armado, com vistas na identificação das possíveis causas, bem como a proposição de soluções factíveis para os problemas de fissuração.

Piso de concreto

Um piso de concreto, de acordo com a Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho – ANAPRE (2016), é definido como um elemento estrutural de placa em concreto armado que tem como função resistir e transferir carregamentos estáticos e dinâmicos de forma pontual ou distribuída à fundação.

Rodrigues (2016) destaca que, quando se trata de projeto e execução de pisos de concreto no mercado brasileiro, apenas 40% dos 42 milhões de metros quadrados executados no ano de 2011, por exemplo, possuíam especificação técnica adequada. Dessa forma não é difícil identificar um dos fatores que tem contribuído para os problemas estruturais nos pisos de concreto.

Manifestações patológicas em piso de concreto

Em se tratando de pisos de concreto, pesquisadores como Garber (1991), Suh e Cullough (1994), Walsh *et al.* (2001), Gasparetto (2001), Suprenant (2002), Walsh e Asce (2007) e Mynarcik (2013) têm buscado alternativas para identificar as causas do surgimento de problemas como a fissuração, rompimento da placa de concreto, empenamento das bordas, delaminação, esborcinamento das juntas de dilatação.

Os problemas de fissuração e empenamento das bordas podem gerar problemas ainda maiores quando a sub-base do piso de concreto se trata de lajes em concreto, visto que as aberturas dos pisos possibilitam a passagem de agentes físicos e químicos causadores da deterioração da estrutura subjacente, podendo levar o sistema ao colapso progressivo. Quaisquer dos tipos de fissuras podem gerar sérios problemas nas estruturas, se não tratadas em tempo hábil. A minimização da ocorrência das mesmas é o que se busca na fase de projeto. Alguns problemas de fissuração recorrentes em pisos de concreto na localidade dessa pesquisa podem ser observados na Figura 1.



Figura 1 – Exemplos de manifestações patológicas em pisos de concreto.

Na Figura 1, os pneus dos veículos promovem um acréscimo de tensões advindas pelas cargas no sistema. A água que percola pelas fissuras dá início ao processo degenerativo da estrutura e, paulatinamente, o sistema poderá entrar em colapso. Quando a situação está avançada, as infiltrações oxidam as armaduras e a proliferação da patologia começa a atingir outros elementos estruturais, como vigas e pilares (Figura 1e).

Um esquema de representação da situação que tem ocorrido de forma recorrente na região onde esta pesquisa foi desenvolvida pode ser observado na Figura 2.

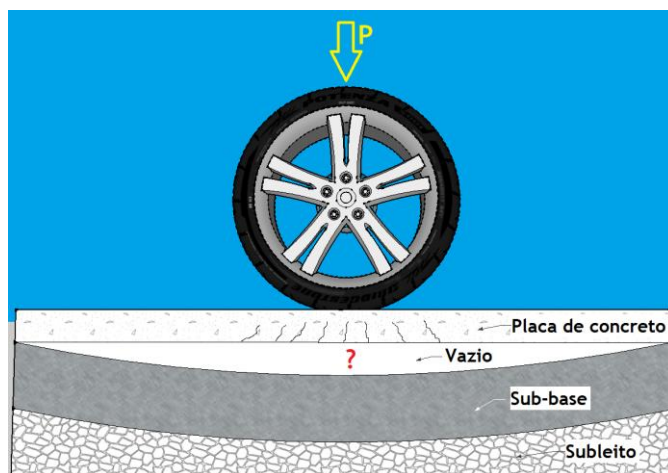


Figura 2 – Placa de concreto sujeita ao rompimento.

No caso da Figura 2, o uso inadequado do piso em função de sobrecargas e carregamentos não previstos em projeto podem provocar deformações excessivas na estrutura, deixar um vazio entre a placa de concreto e a sub-base em função da diferença de rigidez entre as mesmas e levar ao rompimento da placa.

Materiais e métodos

Área de estudo, estrutura da pesquisa e caracterização das amostras

O local da pesquisa abrangeu parte do Agreste Pernambucano, nas cidades de Caruaru e Garanhuns, cujos quantos de obras residenciais e industriais que fazem uso do piso de concreto como revestimento tem se elevado na última década. De modo análogo, os índices das edificações que apresentam problemas patológicos relacionadas aos pisos de concreto nessa região têm crescido exponencialmente.

Utilizando as metodologias propostas por Cunha (2013), Gholamhoseini *et al.* (2014), Majdi *et al.* (2014) e Loprencipe e Cantisani (2015), essa pesquisa fez uso de um programa computacional que utiliza o MEF para análise não-linear de estruturas de concreto, o ANSYS® Workbench em sua versão educacional.

As variáveis analisadas foram as concentrações de tensões nas bordas das placas e as deflexões máximas nos elementos que compõe a estrutura do piso em função da variação do módulo de deformação longitudinal do concreto e do coeficiente de fricção na região de contato das placas. De um modo geral, foram analisados os pontos críticos no topo da placa do piso de concreto no intuito de verificar se os mesmos contribuem para a propagação das fissuras e o rompimento da placa de concreto.

Para efeitos de modelagem, análise de dados e estudo dos pontos críticos de tensões e deformações, os sistemas estruturais adotados para os pisos de concreto com seus estados de carregamento e previsão de uso seguem descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Características gerais das amostras utilizadas.

Código Amostra	Piso de concreto	Sub-base	Dimensões	Carregamento previsto	Uso
PCLM	Simples	Laje maciça	Comprimento: 2 m Largura: 2 m	Pedestres e tráfego de veículos leves	Residencial e comercial
PCLN		Laje nervurada	Altura piso: 10 cm Altura laje: 15 cm		

De mesmo modo, as características das sub-bases seguem na Tabela 2.

Tabela 2 – Características das sub-bases das amostras.

Código da Amostra	Altura das Lajes (cm)	Área de Aço (cm ² /m)	Material Inerte	Armadura
PCLM	15	As,mín	EPS	φ 6.30 mm c/20 cm
PCLN	15	As,mín	(B8/40/40)	TR08645

A adoção desses sistemas estruturais justifica-se em função dos mesmos estarem sendo amplamente utilizados na região em que essa pesquisa está inserida.

Dentro de cada amostra, uma subdivisão foi feita para analisar as propriedades do sistema em função da modificação das variáveis. Assim, para cada amostra, variou-se o módulo de deformação longitudinal do concreto e o coeficiente de fricção entre as placas. Na Tabela 3, a subdivisão das amostras com suas variações pode ser observada.

Tabela 3 – Subdivisão das amostras em função da modificação das variáveis.

Código da Amostra	Módulo de Deformação Longitudinal (<i>E_{ci}</i>)	Coefficiente de Fricção entre as placas
PCLM-A1	28 GPa	0,1
PCLM-A2		0,5
PCLM-A3		0,1
PCLM-A4		0,5
PCLN-A1	28 GPa	0,1
PCLN-A2		0,5
PCLN-A3		0,1
PCLN-A4		0,5

Para o *E_{ci}*, sua variação se deu em função da necessidade de caracterização em serviço do sistema para diferentes dimensões de placas e resistência do concreto. Optou-se pela variação do *E_{ci}* ao invés da altura das placas, em conformidade com a equação de rigidez à flexão da teoria clássica das placas (TIMOSHENKO; GOODIER, 1951).

No caso do coeficiente de fricção, essa variação possibilitou verificar o comportamento estrutural do sistema na região de contato entre as placas, considerando que há, em alguns casos, a inserção de uma manta de proteção entre as placas de concreto, o que modifica o comportamento do conjunto. Assim, o coeficiente de 0,5 foi adotado para as amostras que não apresentam a manta de isolamento, considerando a ligação entre as placas de concreto de diferentes idades. O coeficiente de 0,1 foi utilizado quando da utilização da manta, pois a aderência é praticamente nula (MAJDI *et al.* 2014).

Procedimentos de discretização e cálculo

Inicialmente foi feita a escolha do sistema estrutural do piso. A modelagem do sistema no programa foi realizada através de entrada gráfica, por meio de definições geométricas e numéricas, com o estabelecimento de elementos de contorno.

Durante a modelagem, cada sistema estrutural foi discretizado através de um modelo de malhas, formando um conjunto composto por subconjuntos em forma de quadriláteros infinitesimais, conhecido como barras e nós, tanto para representar a laje de sub-base quanto o piso e o sólido de projeção da área de contato do pneu com o piso.

Os parâmetros de nós e elementos das amostras podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Características das malhas para as amostras analisadas.

Tipo da amostra	Quantidade de nós	Quantidade de elementos	Suavização	Função de ajuste	Centro de relevância
PCLM	13895	9128	Alta	Proximidade e curvatura	Fino
PCLN	152033	28863	Alta	Adaptativa	Fino

As variações de alguns parâmetros da configuração das malhas foram necessárias para que os modelos fossem melhor caracterizados.

Os elementos utilizados para as análises foram o SOLID65, para o concreto; o LINK180, para as armaduras; e CONTA174, para a região de contato entre as placas.

As perspectivas 3D das geometrias e configurações das malhas das amostras modeladas no ANSYS® Workbench podem ser observadas na Figura 3.

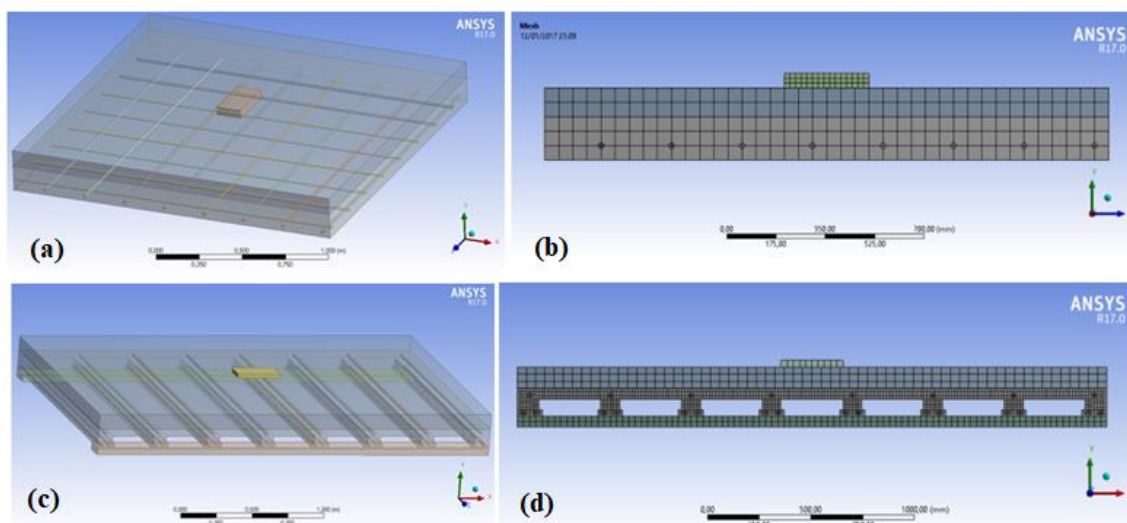


Figura 3 – Geometrias e malhas das amostras.

Na Figura 3a, tem-se a amostra PCLM. Verifica-se um sólido no centro da placa. Este foi inserido para simular o carregamento como uma projeção do pneu no piso. A carga aplicada foi de 750 Kgf. Na Figura 3b, verifica-se a malha gerada, com elementos quadriláteros de 25 mm de tamanho. Na Figura 3c, segue a geometria da amostra do

piso de concreto apoiado sobre laje treliçada com vigotas nervuradas, amostra PCLN, cujos apoios das bases foram inseridos para dar condições de apoio suficientes para rodar o modelo no programa. A amostra com o sistema de malhas definido pode ser verificada na Figura 3d. Nesse caso, considerando a maior complexidade da geometria da sub-base do sistema, foram considerados elementos de tamanhos distintos. No piso de concreto e nos apoios, foi adotado 45mm e para a laje treliçada, 15 mm.

Os processos de cálculo seguiram os ritos conforme o Método dos Elementos Finitos estabelece. Os pontos iniciais de busca a serem determinados foram os deslocamentos e rotações. Os demais esforços como as tensões, deformações e reações foram obtidos através da diferenciação dos deslocamentos nos nós dos elementos (MARINHO, 2002). Conclusas as atividades, os resultados ficaram disponíveis para análise e comparação. Os dados de tensões e deflexões máximas foram tabulados em planilhas eletrônicas. Os limites verificados nas amostras foram comparados entre si e investigados quanto ao grau de responsabilidade em relação ao surgimento das anomalias estruturais.

Os parâmetros adotados nesta pesquisa em relação a critérios de projeto, procedimentos de cálculo e verificações dos estados limites obedeceram às recomendações previstas nas normas regulamentadoras brasileiras, de modo a garantir todos os requisitos vigentes quanto ao sistema construtivo estrutural.

Resultados e discussão

Foram obtidos os parâmetros das análises em relação ao comportamento global dos sistemas. Os comportamentos globais das amostras podem ser identificados a seguir.

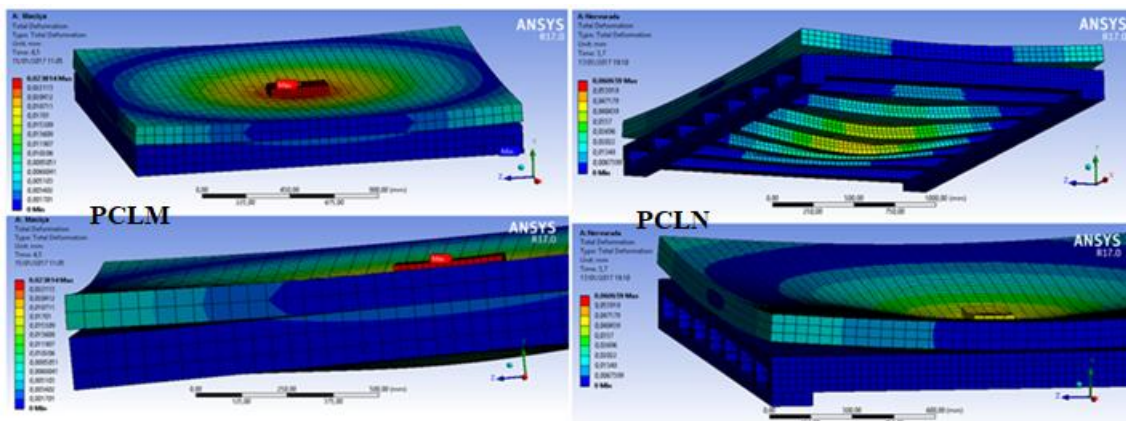


Figura 4 – Comportamento global das amostras.

Uma breve análise permite evidenciar o comportamento do sistema, onde ocorre um deslocamento das bordas quando da aplicação da carga. Apesar das maiores deformações ocorrerem no centro da placa, as bordas da placa de concreto simples são grandemente afetadas em relação às deformações, o que contribui para o surgimento do processo de fissuração (Figura 4). Em se tratando de deflexão máxima, as amostras PCLM obtiveram um desempenho de 39,26% superior às amostras PCLM.

Na Tabela 5, parâmetros de tensão e deformação em função de E_{ci} e C_f podem ser analisados.

Tabela 5–Parâmetros de tensão e deformação das amostras em diferentes E_{ci} e C_f .

Parâmetro/Amostra	PCLM-A1	PCLM-A2	PCLM-A3	PCLM-A4
E_{ci} (GPa)	28	28	56	56
C_f	0,1	0,5	0,1	0,5
Tensão ($\text{MPa} \cdot 10^{-3}$)	2,585	2,504	2,5861	2,5054
Deformação ($\text{mm} \cdot 10^{-3}$)	8,5661	8,1835	4,2881	4,0982
Parâmetro/Amostra	PCLN-A1	PCLN-A2	PCLN-A3	PCLN-A4
E_{ci} (GPa)	28	28	56	56
C_f	0,1	0,5	0,1	0,5
Tensão ($\text{MPa} \cdot 10^{-3}$)	7,8185	7,8182	7,8246	7,8249
Deformação ($\text{mm} \cdot 10^{-3}$)	2,6929	2,3376	1,4903	1,3365

Com a variação do E_{ci} , foi possível observar uma redução nas deformações, independente da variação de C_f . Verificou-se uma redução das deformações da ordem de 49,94%, (amostras PCLM) e 44,66% (amostras PCLN). Na Figura 5, as reduções das deformações na região de contato das bordas das placas em função dessa variação podem ser identificadas.

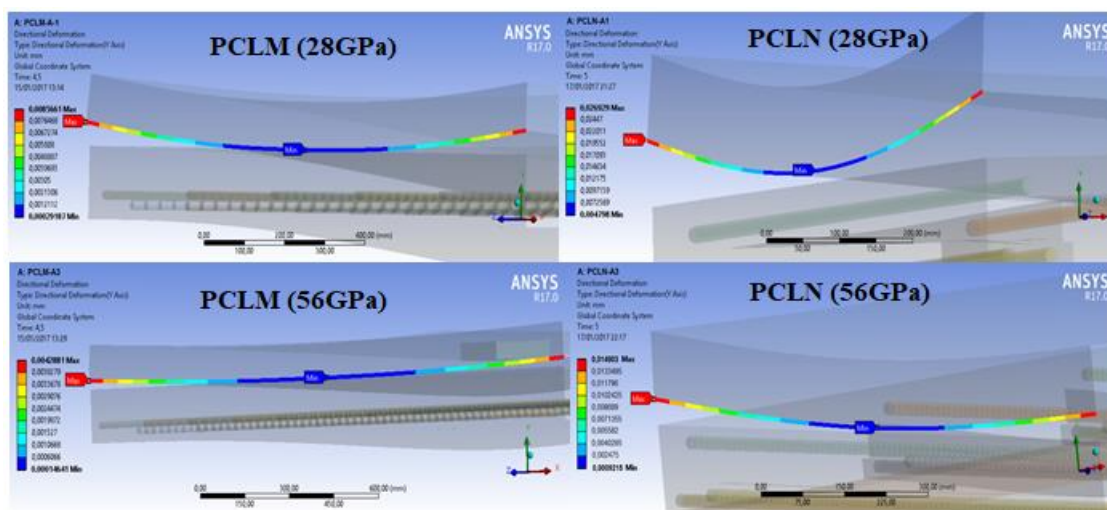


Figura 5 – Deformações na região de contato das amostras PCLM e PCLN.

Com uma média de redução de 49,94% das deformações nas amostras PCLM e 44,66% nas amostras PCLN, fica evidente a influência da resistência característica do concreto no comportamento do conjunto, considerando sua contribuição na redução das deformações nos bordos da placa e no processo de fissuração.

Além da resistência característica, outros fatores também podem contribuir para com a redução desse processo, já que o E_{ci} está também relacionado com as características dos agregados utilizados, por exemplo. Os valores adotados para determinação do E_{ci} em função do tipo de agregado utilizado na matriz do concreto variam de 0,7 a 1,2 para concretos de 20 a 50 MPa, NBR6118 (ABNT, 2014). Nas amostras desta pesquisa, adotou-se o valor de 1,0, referente ao agregado do tipo granito e gnaíse.

Foi verificado que o momento resistente na borda da placa pouco contribui para o surgimento e propagação de fissuras, visto que o momento de fissuração para uma placa de concreto com as características das amostras dessa pesquisa, segundo a NBR 6118

(ABNT, 2014), é da ordem de 28,8 KN.m. O maior valor de momento na borda da placa identificado nas amostras foi de 0,7 KN.m, o que descarta a possibilidade de problemas de fissuração em função do momento resistente de fissuração.

Analisou-se, ainda, a influência da aderência do conjunto e sua contribuição no processo de fissuração. Essa análise foi realizada considerando duas situações: ligação entre as placas por aderência entre concretos de diferentes idades ($C_f = 0,5$) e a utilização da manta de isolamento ($C_f = 0,1$) na região de contato. Foi constatado que a utilização da manta de isolamento para as amostras PCLM representa um acréscimo de deformação da ordem de 4,45%. Nas amostras PCLN, o índice foi de 11,75%.

Na Figura 6, é possível verificar a área na cor amarela que grande parte da região de divisa entre as placas de concreto não estão conectadas, mas sim próximas. Pontos escassos de contato e deslizamento foram observados nas regiões em vermelho e laranja. Logo, conclui-se que há um problema aderência entre as placas.

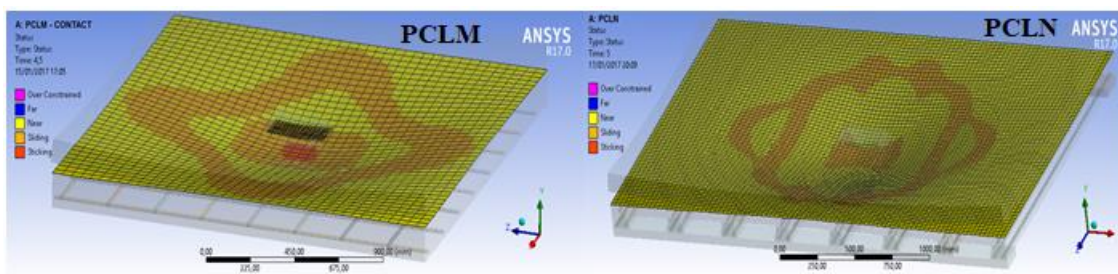


Figura 6 – Região de contato entre as placas de concreto das amostras.

Desse modo, conclui-se que o problema de aderência entre as placas pouco depende da ligação entre concretos de diferentes idades ou da utilização de manta de proteção. Nesse caso, há um problema de fluxo de cisalhamento nas amostras pela má aderência, tornando necessário um travamento na região de contato entre placas pela inserção de pinos/barras rígidas de ligação entre as placas de concreto, para que o sistema estrutural possa trabalhar de forma homogênea e garantir melhor desempenho em serviço.

Conclusões

Esta pesquisa proporcionou a obtenção dos seguintes resultados:

- Constatação da má aderência existente entre as placas de concreto, independente da inserção da manta de isolamento na região de contato;
- Em relação ao comportamento global, a amostra PCLM obteve melhor desempenho frente às deflexões máximas, da ordem de 39,26% em relação à amostra PCLN;
- Na região das bordas, as amostras PCLM apresentaram melhores respostas em relação às tensões e deformações, sendo constatada uma redução de aproximadamente dez vezes, quando comparado com os mesmos parâmetros de resposta nas amostras PCLN, independente da modificação de qualquer variável;
- A fissuração nas bordas das placas não está diretamente relacionada ao momento resistente de fissuração e, sim, do efeito do empenamento das bordas por problemas no fluxo de cisalhamento;

- Necessidade de inserção de pinos de travamento na região de contato entre as placas, tanto para os pisos de concreto que tem como sub-base uma laje maciça ou nervurada, de modo a fazer com que as peças trabalhem em conjunto e tenha um melhor desempenho estrutural frente ao estado de carregamento.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 302.1R: Guide for concrete floor and slab construction. Farmington Hills, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO – ANAPRE. Boletins Técnicos. Disponível em: <<http://www.anapre.org.br>>. Acesso em 28 de março de 2016.
- CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A.. Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e construtivos. São Paulo: Reggenza, 2007.
- CUNHA, P. F. Dimensionamento e análise numérica de pisos industriais de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UERJ. Rio de Janeiro, 2013.
- GARBER, G. Design and Construction of Concrete Floor George Garber: Design and Construction of Concrete Floor – Curling. Edward Arnold, London, 1991.
- GASPARETTO, W. E. Manual técnico de barras de transferência e espaçadores soldados. São Paulo, 2001.
- GHOLAMHOSEINI, A.; GILBERT, R. I.; BRADFORD, M. A.; CHANG, Z. T. Longitudinal shear stress and bond-slip relationships in composite concrete slabs. Engineering Structures. Elsevier, Vol. 69, p.37-48. 2014.
- LOPRENCIPE, G.; CANTISANI, G. Evaluation methods for improving surface geometry of concrete floors: A case study. Case Studies in Structural Engineering, p.14-25, 2015.
- MAJDI, Y.; HSU, C. T.; ZAREI, M. Fine element analysis of new composite floors having cold-formed steel and concrete slab. Engineering Structures. Vol. 77, p.65-83, 2014.
- MARINHO, I. J. P. Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2002.
- MYNARCIK, P. Technology and trends of concrete industrial floors. Concrete and Concrete Structures 2013 Conf. Procedia Engineering, Elsevier, Vol. 65, p.107-112, 2013.
- RODRIGUES, P. P. F. Pisos Industriais: evolução e novas alternativas. In: Concreto & Construções. IBRACON. ISSN 1809-7197. Ano XLIII, Nº 81, 2016.
- SUH, Y. C.; CULLOUGH, B. F. Factors affecting crack width of continuously reinforced concrete pavement. Journal of Transportation Research Record, Nº 1449, 1994.
- SUPRENANT, B., A. Why Slabs Curl Part I: a look at the curling mechanism and the effect of moisture and shrinkage gradients on the amount of curling. Concrete International, 2002.
- SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC. ANSYS Mechanical User's Guide. Southpoint, 275 Technology Drive, PA 15317, Release 15.0, Canonsburg, USA, 2013.
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. Theory of Elasticity. McGraw-Hill Inc., NY, 1951.
- WALSH, K. D.; ASCE, M. Performance of methods for analysis of relative floor measurements in residential structures. Journal of Performance of Constructed Facilities. Elsevier, Vol. 21, p. 329-336, 2007.
- WALSH, K. D.; BASHFORD, H. H.; MASON, B.C.A. State of practice of residential floor slab flatness. Journal of Performance of Constructed Facilities. Vol.15, p.127-134, 2001.