

CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PLASTICIDADE DANIFICADA DO CONCRETO PARA LAJES LISAS NO ABAQUS

CALIBRATION OF CONCRETE DAMAGED PLASTICITY MODEL PARAMETERS FOR FLAT SLABS IN ABAQUS

*Vinícius D'Almeida Rodrigues Ramos*¹

*Elyson Andrew Pozo Liberati*¹

*Leandro Mouta Trautwein*²

Resumo: Nesse trabalho foram realizadas análises não lineares em elementos finitos para investigar o comportamento de lajes lisas submetidas à punção. As análises foram conduzidas por meio da calibração dos parâmetros de plasticidade do modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP), presente no software ABAQUS, e então comparadas aos resultados experimentais ligações laje-pilar com aberturas circulares adjacentes ao pilar interno. A calibração indicou a dependência dos modelos quanto à alguns parâmetros, e ainda, que os modelos propostos podem prever adequadamente a capacidade resistente à punção das lajes.

Palavras-chaves: Lajes lisas; Punção; ABAQUS; Análise numérica; CDP.

Abstract: In this work, nonlinear finite element analyses were conducted to investigate the punching shear capacity of flat slabs. The analyses were conducted by calibrating the plasticity parameters of the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model, present in ABAQUS, and then compared to the experimental results of slab-column joints with circular openings adjacent to the internal column. The calibration indicated the dependence of the models on some parameters, and also that the proposed models can appropriately predict the punching shear capacity of the slabs.

Keywords: Flat slabs; Punching shear; ABAQUS; Numerical analysis; CDP.

¹Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, email: pg404629@uem.br; eaoliberati@uem.br

²Universidade Estadual de Campinas, Campinas – Brasil, email: leandromt@fec.unicamp.br

1 Introdução

Sabe-se que nos últimos anos os projetos de edifícios têm se desenvolvido por meio de concepções arquitetônicas que buscam sistemas estruturais adequados à modernidade, em que a empregabilidade de elementos esbeltos condiz com tais propostas de inovação. Neste contexto, destacam-se as lajes lisas, definidas como estruturas laminares horizontais (maciças ou nervuradas) em concreto armado ou protendido, apoiadas diretamente em pilares, não possuindo vigas para transferência de esforços (ABNT NBR 6118, 2023). A principal desvantagem desse elemento estrutural é a ocorrência da falha por punção, que é causada devido à altas tensões de cisalhamento na área da ligação laje-pilar (**Figura 1**).

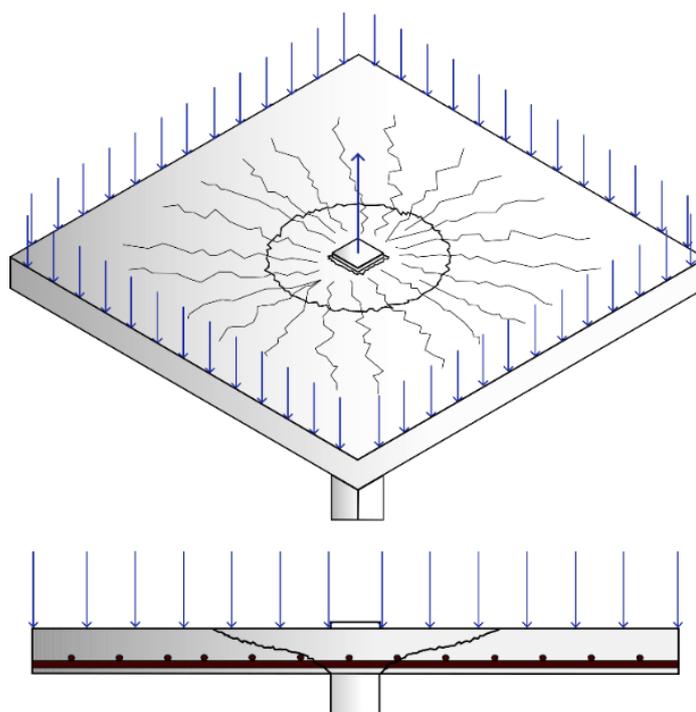


Figura 1. Mecanismo de falha por punção em lajes lisas de concreto armado.

Muitos trabalhos experimentais e numéricos foram desenvolvidos afim de estudar o comportamento de lajes lisas em concreto armado. Como exemplo, cita-se o trabalho de Muttoni (2008), que estudou o mecanismo de falha em lajes lisas sem a presença de armaduras de cisalhamento, evidenciando que a punção ocorre a partir da propagação de uma fissura crítica devido às tensões de cisalhamento próximas aos pilares. Genikomsou e Polak (2015) estudaram, por meio da construção de modelos numéricos, a variação dos parâmetros de

plasticidade e a viabilidade da utilização do ABAQUS para modelagem do fenômeno de punção, obtendo respostas satisfatórias quanto ao comportamento carga-deslocamento e propagação de fissuras. Já Balomenos et al., (2018) realizaram um estudo da calibração de modelos numéricos de lajes lisas com aberturas retangulares adjacentes à pilares internos, demonstrando que a dimensão e posição destas aberturas pode reduzir a capacidade resistente à punção das lajes estudadas.

As simulações em elementos finitos têm crescido no meio da engenharia estrutural, haja vista sua capacidade de fornecer resultados complementares aos ensaios experimentais, além de poupar tempo e custo para a realização dos mesmos. Dentre os modelos utilizados para representar o comportamento do concreto, o Concrete Damaged Plasticity (CDP) é um modelo elastoplástico com dano presente no ABAQUS que tem como objetivo principal analisar estruturas de concreto sob carregamentos cíclicos ou dinâmicos. O modelo de dano plástico do ABAQUS é baseado nos modelos propostos por Lubliner et al. (1989) e por Lee e Fenves (1998). A análise não linear de elementos finitos utilizando o CDP pode demonstrar diversos aspectos referentes ao comportamento de uma estrutura, desde a formação e propagação de fissuras, deflexões, deformações, até prováveis mecanismos de falha.

Diante disso, o presente trabalho visa apresentar a modelagem de ligações laje-pilar com presença de aberturas circulares próximas aos pilares internos por meio da calibração dos parâmetros do Concrete Damaged Plasticity, oferecido pelo software ABAQUS. Os modelos constitutivos utilizados para representar o comportamento do concreto são descritos, incluindo a variação dos parâmetros de plasticidade e variação da energia de fratura do concreto.

Os resultados das análises numéricas foram comparados aos resultados experimentais em termos de deslocamento, carga de ruptura e propagação de fissuras. Os resultados numéricos se aproximaram dos resultados experimentais e demonstraram que a utilização do Concrete Damaged Plasticity (CDP) é uma boa alternativa para representar o comportamento de punção em lajes lisas.

2 Lajes Estudadas

A análise experimental executada por Liberati (2019) compreendeu o ensaio de nove lajes lisas quadradas com 1800 mm de lado e 130 mm de espessura. As principais variáveis do estudo foram a presença, ou não, de aberturas adjacentes ao pilar interno. As lajes não possuíam

armadura de cisalhamento, e as dimensões dos pilares (150 mm x 150 mm) e das aberturas (150 mm) foram mantidas constantes, conforme apresentado na **Figura 2**.

Três séries de estudo foram executadas por Liberati (2019). A série 1 foi composta por três lajes de referência (LR-A, LR-B e LR-C). A série 2 foi composta por três lajes com uma abertura adjacente ao pilar (LF1-A, LF1-B e LF1-C). Já a série 3, foi composta por três lajes com duas aberturas adjacentes ao pilar (LF2-A, LF2-B e LF2-C). As propriedades mecânicas e geométricas das lajes, bem como das armaduras utilizadas estão expostas nas **Tabelas 1 e 2**, respectivamente.

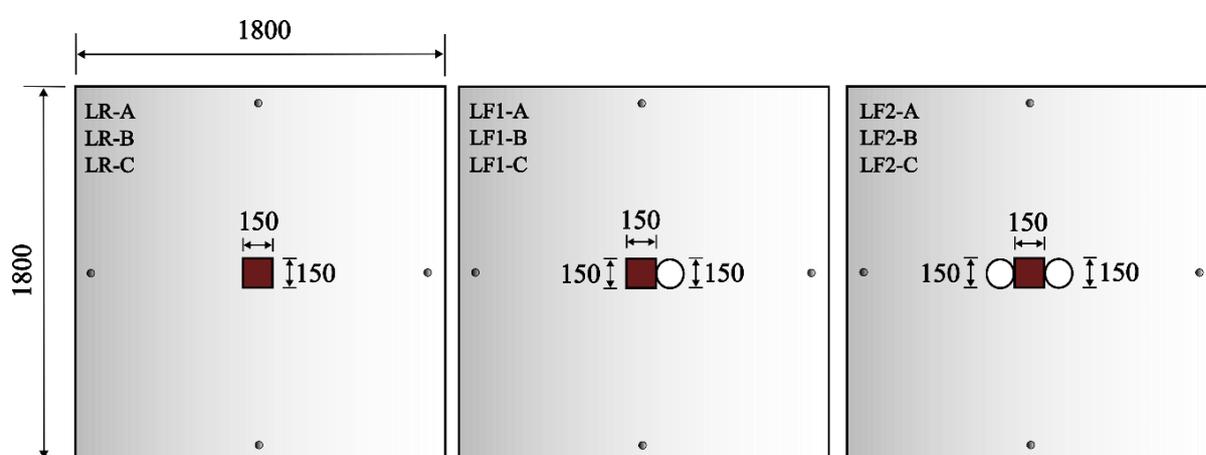


Figura 2. Lajes lisas estudadas, medida em mm, adaptado de Liberati (2019).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas e geométricas das lajes estudadas por Liberati (2019)

Séries	Laje	d [mm]	ρ [%]	f_c [MPa]	f_i [MPa]	E_c [GPa]
Lajes de referência	LR-A	89	1.62	41.56	4.13	25.19
	LR-B	88	1.65			
	LR-C	90	1.58			
Lajes com uma abertura	LF1-A	90	1.27	44.54	4.29	28.40
	LF1-B	88	1.34			
	LF1-C	91	1.26			
Lajes com duas aberturas	LF2-A	92	1.14	35.22	3.25	23.60
	LF2-B	95	1.08			
	LF2-C	93	1.12			

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das armaduras

Diâmetro da barra	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E_s [GPa]
ϕ 6.3 mm (armadura inferior)	668.00	742.61	200.59
ϕ 12.5 mm (armadura superior)	575.93	748.35	178.68

3 Análise em elementos finitos

3.1 Concrete Damaged Plasticity (CDP)

Para a utilização do CDP no software ABAQUS, é necessário informar os valores de alguns parâmetros que definem o comportamento do concreto, sendo estes descritos a seguir:

a) Ângulo de dilatação (ψ): Parâmetro associado a mudança de volume do material, causada pelas deformações plásticas que ocorrem em materiais frágeis, como o concreto.

b) Excentricidade potencial de fluxo (ϵ): Segundo o Manual de Usuários do ABAQUS (2012), o valor default para este parâmetro é 0,1. Sendo assim, considera-se que o concreto possui o mesmo ângulo de dilatação para uma ampla faixa de pressões confinantes.

c) f_{b0}/f_{c0} : É a razão entre a resistência do concreto à compressão biaxial (f_{b0}) e a resistência à compressão uniaxial (f_{c0}). O valor default para esse parâmetro é de 1,16.

d) Fator de forma (K_c): Representa a razão da distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração e de compressão do plano desviatório. Seu valor deve satisfazer a condição de $0,5 < K_c < 1,0$. Normalmente, utiliza-se o valor default de $2/3$.

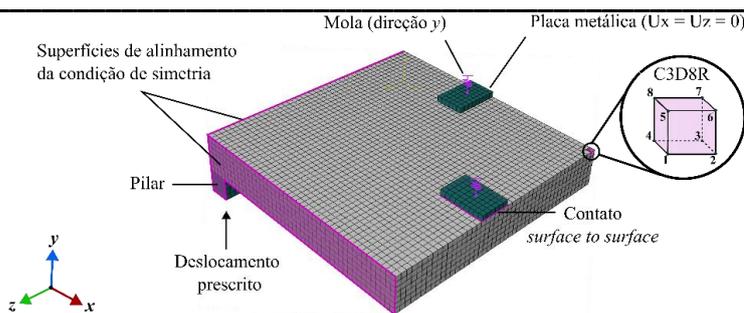
e) Viscosidade (μ): Parâmetro relacionado ao tempo de relaxação do material. O dano é introduzido ao material a partir da definição desse parâmetro, sendo assim, necessária sua calibração.

f) Energia de fratura (G_f): Energia consumida por unidade de superfície durante o processo de formação de fissuras.

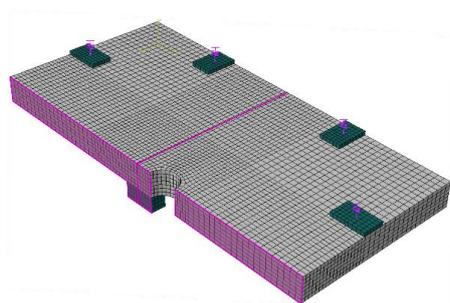
3.2 Descrição dos modelos numéricos

Todas as lajes experimentais foram simuladas através da modelagem em elementos finitos utilizando o *software* ABAQUS. Afim de reduzir o custo computacional, optou-se por explorar o recurso de simetria. Portanto, para as séries LR e LF2, apenas um quarto das lajes foi modelado, por outro lado, para a série LF1 apenas metade da laje foi construída afim de representar as lajes experimentais (**Figura 3**). O concreto e as placas metálicas que simulam o pilar e as vigas de reação foram representados por elementos C3D8R, e as armaduras por elementos T3D2. Para reduzir o tempo de processamento do modelo LF1, optou-se por utilizar um refinamento de malha na região próxima a zona carregada, onde é esperado que ocorra a falha por punção. As condições de contorno foram aplicadas na face superior das placas metálicas. Teste iniciais considerando a restrição vertical total dos apoios resultaram em respostas mais rígidas no comportamento carga-deslocamento das lajes. Assim, optou-se por utilizar elementos de mola lineares na direção do eixo Y, vide **Figura 3**. O valor do coeficiente de rigidez das molas foi calculado através de uma relação entre a carga de ruptura das lajes experimentais e as médias dos deslocamentos medidos nos apoios T1, T2, T10 e T11.

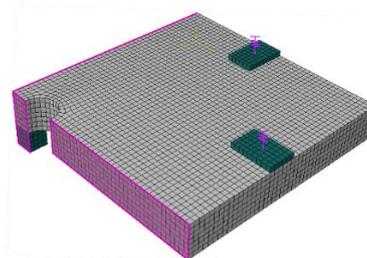
A interação entre as armaduras e o concreto foi definida como *embedded region*, considerando a aderência perfeita entre os materiais. O contato entre as placas metálicas e a laje foi definido através de um comportamento tangencial e normal. A convergência dos modelos foi realizada por meio do controle de deslocamento de modo estático (*Static General*). Para o processo iterativo de solução foi utilizado o método de Newton-Raphson. Para representar o comportamento do concreto a compressão utilizou-se o modelo da norma *fib* Model Code (2010). Já para o comportamento à tração, o modelo constitutivo selecionado foi o de tensão-abertura de fissura apresentado por Hordijk (1991). Mesmo com a aplicação de elementos de mola, fez-se necessária a correção da resistência à tração, sendo estimada também pela norma *fib* Model Code (2010).



(a) LR-FEA



(b) LF1-FEA



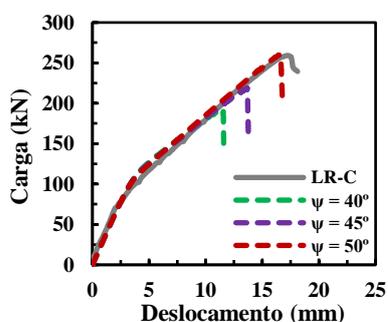
(c) LF2-FEA

Figura 3. Geometria, condições de contorno e malha de elementos finitos das lajes.

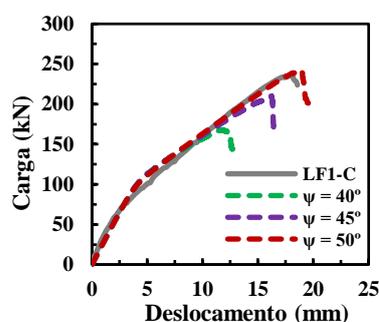
3.3 Calibração dos parâmetros de plasticidade

3.3.1 Variação do ângulo de dilatação

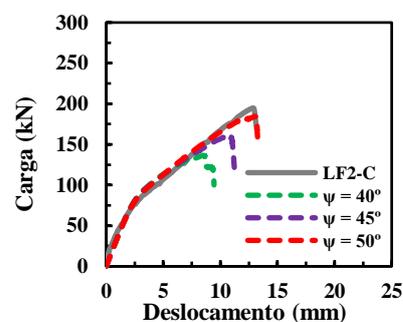
Os resultados de carga-deslocamento para a variação do ângulo de dilatação são apresentados na **Figura 4**. Afim de analisar a sensibilidade dos modelos quanto a alteração desse parâmetro, variou-se entre os valores de 40°, 45° e 50°. Observou-se que para valores abaixo de 50°, os modelos numéricos apresentaram capacidade de carga muito inferior aos resultados experimentais, ultrapassando o limite de 15% de diferença para todos os casos.



(a) LR-FEA



(b) LF1-FEA



(c) LF2-FEA

Figura 4. Resultados da variação do ângulo de dilatação.

3.3.2 Variação do parâmetro de viscosidade

Para avaliar o impacto da viscosidade no modelo numérico, foram estabelecidos os valores de 10^{-3} , 10^{-4} e 10^{-5} . A variação mostrou que menores valores de viscosidade tendem a apresentar resultados mais satisfatórios, além de representar a ruptura dos modelos, porém aumentam significativamente o custo computacional.

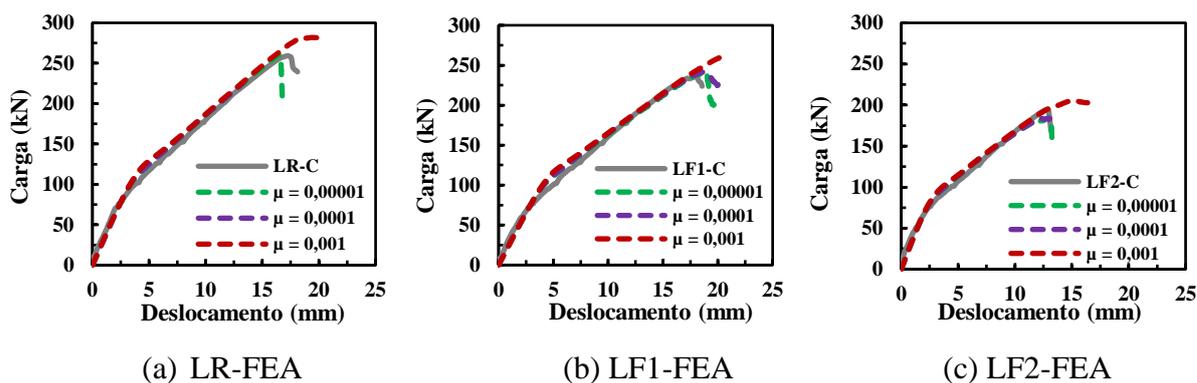


Figura 5. Resultados da variação da viscosidade.

3.3.3 Variação da energia de fratura

Afim de avaliar a alteração da energia de fratura nos modelos numéricos, realizou-se a variação desse parâmetro entre os resultados experimentais, e os valores estimados pelas normas CEB-FIB MODEL CODE (1990) e *fib* Model Code (2010). Os resultados mostraram que quanto maior a energia de fratura, maior a capacidade de carga do modelo numérico.

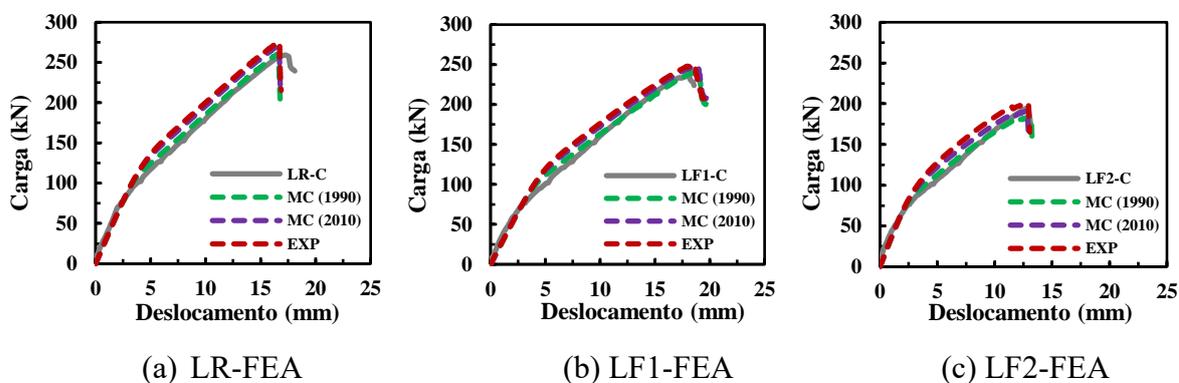


Figura 6. Resultados da variação da energia de fratura.

5 Conclusões

Nesse artigo foram realizadas análises da alteração dos parâmetros do modelo de plasticidade danificado do concreto (CDP), fornecido pelo *software* ABAQUS, afim de avaliar o impacto desses parâmetros nas respostas carga-deslocamento de três lajes sem e com aberturas circulares adjacentes aos pilares. Primeiramente validou-se os modelos constitutivos que representam o comportamento do concreto através de resultados experimentais. Após a validação dos modelos numéricos e o estudo da variação dos parâmetros de plasticidade, obteve-se as seguintes conclusões:

1. A variação do ângulo de dilatação (ψ) gera alteração da capacidade de carga dos modelos numéricos, em que para maiores valores, as simulações tendem a apresentar maior capacidade de carga e de deslocamento.
2. Ao variar a viscosidade do material, foi possível observar que este parâmetro está diretamente ligado ao modo de ruptura das lajes, em que para menores valores de viscosidade a ruptura é brusca. Para maiores valores, a ruptura tende a ser gradual, ou ainda, não é captada pelo modelo. Além disto, foi evidente que o tempo de processamento dos modelos é altamente dependente do parâmetro de viscosidade.
3. Quanto a energia de fratura, observou-se que para maiores valores, o modelo numérico apresenta um aumento na carga de ruptura, evidenciando um aumento da capacidade de carga.

Dado o exposto, entende-se que os modelos se mostraram dependentes do ângulo de dilatação, viscosidade e energia de fratura, sendo necessário o ajuste individual para cada um desses parâmetros. Para melhor representar o comportamento carga-deslocamento das lajes aqui estudadas, os parâmetros de plasticidade do *Concrete Damaged Plasticity* foram definidos da seguinte maneira: $\psi = 50^\circ$, $\epsilon = 0.1$, $f_{b0}/f_{c0} = 1.16$, $K_c = 0.667$, $\mu = 0.00001$ e G_f estimado pelo CEB-FIB MODEL CODE (1990).

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Referências

Balomenos, G. P.; Genikomsou, A. S.; Polak, M. A. (2018). Investigation of the effect of openings of interior reinforced concrete flat slabs. **Structural Concrete**, v. 19, ed. 6, p. 1672-

1681, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201700201>

Comité Euro-International Du Béton (1993). CEB-FIB-MODEL CODE 1990: DESIGN CODE. London: Thomas Telford.

Comité Euro-International Du Béton (2010). CEB – FIB MODEL CODE DESIGN CODE 2010: FINAL DRAFT. Bulletin d'Information, CEB, Lousanne, April 2010.

Genikomsou, A. S.; Polak, M. A. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**, v. 98, p. 38-48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.016>

Liberati, E.A.P. (2019). Análise de confiabilidade de lajes lisas de concreto armado submetidas à punção. 2019. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

Muttoni, A. (2008). Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement, **ACI Structural Journal**, v. 105, p. 440-450, 2008. DOI: 10.14359/19858

Sacramento, P. V. P.; Ferreira, M. P.; Oliveira, D. R. C.; Melo, G. S. S. A. (2012). Punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento. **IBRACON Structures and Materials Journal**. Volume 5, n 5, p. 659-691 (ISSN 1983-4195), 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000500005>