



Cálculo da capacidade à punção em lajes lisas com uso de elementos finitos de placa

Palavras-Chave: ANÁLISE NUMÉRICA, TFCC, RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Autores:

RAMON RODRIGUES GUIMARÃES, FECFAU – UNICAMP

Prof. Dr. LEANDRO MOUTA TRAUTWEIN (orientador), FECFAU - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A concepção estrutural convencional de edifícios no Brasil é caracterizada pelos sistemas reticulados de lajes, vigas e pilares. Contudo, devido às vantagens econômicas e agilidade na execução dos projetos, adotam-se, em geral, os sistemas em que as lajes estão apoiadas diretamente sobre os pilares, também chamadas de lajes lisas (RABELLO, 2010). Apesar das vantagens citadas, a redução do tamanho ou mesmo a ausência de vigas, implica em um aumento dos esforços aplicados sobre a laje. Nesse cenário, a ocorrência de tensões cortantes na região laje-pilar faz com que a laje tenda a ser “perfurada” pelo elemento de apoio, ocasionando o fenômeno conhecido como punção (SANTOS, 2018).

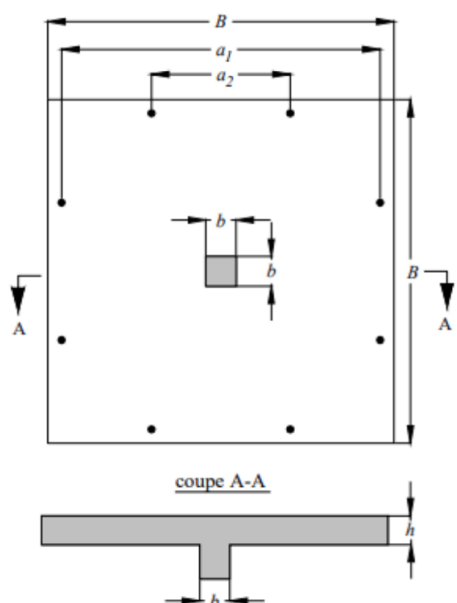
A presença dessa força pontual em um elemento plano provoca a ruína da estrutura de forma abrupta e sem aviso prévio (TRAUTWEIN, 2006) e, por isso, é caracterizada como o modo de falha dominante em lajes lisas (GUANDALINI et al., 2009). Em um sistema reticulado de lajes lisas, a ruptura ocorrida em um dos retículos provoca a redistribuição dos esforços às outras ligações, podendo também colapsá-las (SANTOS, 2018). Devido aos resultados catastróficos da punção, esse fenômeno tem sido objeto de intenso estudo experimental desde a década de 50 (MUTTONI, 2008) e alvo de prescrições normativas, a fim de garantir a segurança pública (RABELLO, 2010).

De acordo com Santos (2018), atualmente não existe um modelo de cálculo definitivo para determinação da punção em lajes lisas de concreto. Nesse sentido, gera-se a necessidade do aprimoramento ou elaboração de novos modelos que sejam confiáveis na previsibilidade no momento e modo de ruptura sobre os sistemas de lajes lisas. Alguns modelos foram desenvolvidos, como, por exemplo, o proposto por Aurelio Muttoni, conhecido como Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento. Esse modelo baseia-se na formação de uma fissura crítica nas proximidades do pilar, prolongando-se ao longo da espessura da laje. Assume-se que a seção possui rotação de corpo rígido a partir da extremidade da fissura, de forma que os carregamentos são transferidos entre as seções por efeito de pino da armadura, engrenamento dos agregados e pela biela comprimida de concreto na região da fissura (MUTTONI, 2008).

A combinação deste modelo com softwares de simulação numérica permite uma compreensão mais detalhada do comportamento estrutural, considerando as não linearidades geométricas e dos materiais. Além disso, é possível analisar diferentes cenários de carga e verificar a resposta estrutural, proporcionando uma base sólida para o projeto e a tomada de decisões seguras. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi aplicar uma abordagem numérica para a determinação da punção em lajes lisas, avaliando os resultados em relação aos ensaios empíricos para dez lajes.

METODOLOGIA:

Foram modeladas dez estruturas de lajes, seguindo as dimensões utilizadas por o trabalho de GUADALINI e MUTTONI (2004). A representação das lajes, bem como suas dimensões são apresentadas, respectivamente, na Figura 1 e Quadro 1.



Nomenclatura da laje	B	b	a ₁	a ₂	h
PG-1	3000	260	2760	1200	250
PG-2b	3000	260	2760	1200	250
PG-3	6000	520	5160	2400	500
PG-4	3000	260	2760	1200	250
PG-5	3000	260	2760	1200	255
PG-6	1500	130	1380	600	125
PG-7	1500	130	1380	600	125
PG-8	1500	130	1380	600	140
PG-9	1500	130	1380	600	140
PG-10	3000	260	2760	1200	255

Figura 1 - Representação das lajes modeladas – fonte: adaptado de GUADALINI; MUTTONI, 2004.

Quadro 1 – Dimensões das lajes (em mm) – fonte: GUADALINI; MUTTONI, 2004.

A armadura de flexão foi modelada também de acordo com o trabalho de GUADALINI e MUTTONI (2004). A geometria das lajes foi representada no software AutoCAD® (Autodesk Inc, 2023). A fim de reduzir a complexidade estrutural e o tempo de processamento durante as simulações, a modelagem foi feita para $\frac{1}{4}$ de cada laje, considerando que a estrutura possui dois eixos de simetria. A geometria foi importada no software GiD-Atena, no qual realizou-se a modelagem 3D e geração da malha de elementos finitos.

O modelo tridimensional da placa foi criado a partir da seleção das superfícies delimitadoras para cada um dos elementos (pilar, laje e chapas) e definindo o volume a partir destas faces. Entre os elementos foram fixadas as superfícies de contato. Após, prosseguiu-se à representação das armaduras, superior e inferior, por meio da criação de barras cruzadas perpendicularmente. As propriedades do concreto e do aço seguiram o descrito no trabalho de GUADALINI e MUTTONI (2004).

O modelo constitutivo utilizado foi o *CC3DNonLinCementitious2*, de fratura-plasticidade. A malha foi gerada com elementos finitos de placa reduzidos de elementos hexaédricos, denominados em Atena como “*CCIsoShellBrick*”. Visualmente esse tipo de elemento é representado como um elemento tridimensional, mas internamente está formulado como elemento de placa. O uso do elemento “*CCIsoShellBrick*” possibilita a integração dos elementos das armaduras com a malha da laje.

Em relação às condições de contorno, restrições verticais nos apoios e dos deslocamentos perpendiculares aos eixos de simetria foram incluídos. A carga dos ensaios foi representada através de um deslocamento incremental aplicado no centro do pilar em direção à laje (de baixo para cima). Nas análises numéricas, as reações e rotações da laje em relação aos deslocamentos foram coletadas em cada laje. A ruptura por flexão foi determinada como critério de parada na execução da simulação, uma

vez que o software não é capaz de capturar a ruptura por punção - sendo esta determinada com base no critério de falha da TFCC.

As reações e rotações da laje em relação aos deslocamentos foram coletadas em cada ponto. Utilizando as Equações 1 e 2, abaixo foi possível relacionar ambos os parâmetros e avaliar a capacidade à punção para cada uma das lajes, seguindo o procedimento gráfico descrito por MUTTONI (2008). O Quadro 2 reúne os valores dos parâmetros utilizados nas Equações 1 e 2.

$$\frac{V_r}{b_0 \cdot d \cdot \sqrt{f_c}} = \frac{3/4}{1 + 15 \cdot \frac{\omega_R \cdot d}{d_{g0} + d_g}} \quad (1)$$

$$\frac{\omega_R \cdot d}{d_{g0} + d_g} \quad (2)$$

Nomenclatura da laje	d (mm)	f _c (MPa)	b ₀ (mm)	d _{g0} (mm)	d _g (mm)
PG-1	210	27,7	1699,7	16	16
PG-2b	210	40,5	1699,7	16	16
PG-3	456	32,4	3512,6	16	16
PG-4	210	32,2	1699,7	16	4
PG-5	210	29,3	1699,7	16	16
PG-6	96	34,7	821,6	16	16
PG-7	100	34,7	821,6	16	16
PG-8	117	34,7	821,6	16	16
PG-9	117	34,7	821,6	16	16
PG-10	210	28,5	1699,7	16	16

Quadro 2 – Valores dos parâmetros utilizados – fonte: GUADALINI; MUTTONI, 2004.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com os deslocamentos aplicados na simulação foram determinadas as reações sobre as lajes e as rotações máximas atingidas nas simulações (Quadro 3), sendo possível, por meio da Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento determinar o modo de falha da estrutura.

Nomenclatura da laje	Reações ^a (kN)	Reações ^b (kN)	Desvio (%)	Rotações ^a (rad)	Rotações ^b (rad)	Desvio (%)
PG-1	1023	992,63	-3,06	0,0089	0,0062	-43,55
PG-2b	440	432,35	-1,77	0,0301	0,0326	7,67
PG-3	2153	2023,22	-6,41	0,0084	0,0123	31,71
PG-4	408	424,40	3,86	0,0244	0,0294	17,01
PG-5	550	552,98	0,54	0,0247	0,0312	20,83
PG-6	238	430,09	44,66	0,0117	0,0207	43,48
PG-7	241	281,37	14,35	0,0223	0,0245	8,98
PG-8	140	155,49	9,96	0,0318	0,0255	-24,71
PG-9	115	125,96	8,70	0,0421	0,0383	-9,92
PG-10	540	569,86	5,24	0,0223	0,0212	-5,19

Quadro 3 – Parâmetros observados para os deslocamentos aplicados – fonte:

^aGUADALINI; MUTTONI, 2004; ^bObtidas neste trabalho

É possível observar desvios relativamente baixos para todas as lajes, com exceção da PG-6. Vale ressaltar que este resultado é proveniente da simulação prolongada, até o momento em que a estrutura rompesse por flexão. Nesse sentido, apesar do desvio ser maior para a PG-6, o modo de falha para a laje não foi alterado, visto que atingiu o critério de falha tanto pela simulação quanto no ensaio empírico de GUANDALINI et al. (2009) (Figuras 2 e 3).

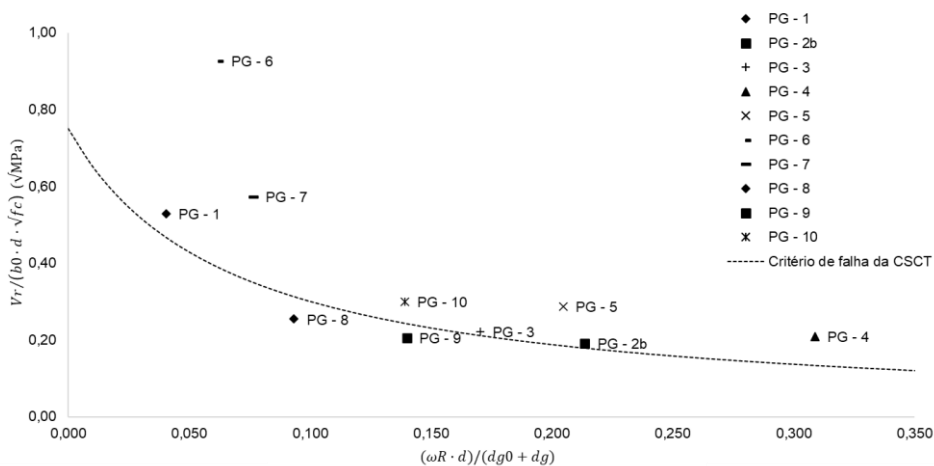


Figura 3 - Resultados obtidos por simulação numérica para a capacidade à punção das lajes frente ao critério de falha da TFCC

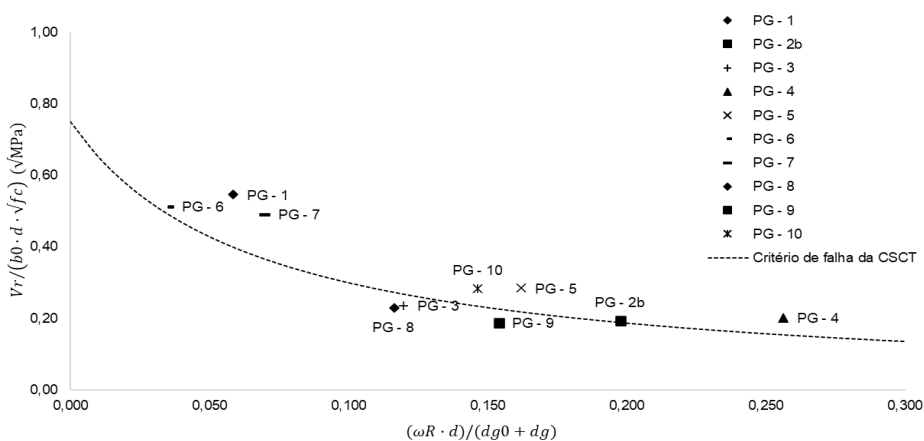


Figura 3 - Resultados de trabalho prévio quanto à capacidade à punção das lajes frente ao critério de falha – fonte: GUADALINI; BURDET; MUTTONI, 2009

Ao comparar o resultado dos rompimentos simulados com o critério de falha (Figura 2, linha tracejada), observa-se que apenas duas lajes (PG-8 e PG-9) apresentaram uma capacidade menor da prevista pelo critério da TFCC. É identificado também que as lajes com menor tamanho e/ou menor taxa de armadura apresentaram maiores rotações, indicando um comportamento de flexo-punção. Este resultado está em concordância com o descrito na literatura, que indica a taxa de armadura como uns dos parâmetros dominantes no fenômeno de punção em lajes lisas GUANDALINI et al. (2009).

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais obtidos por GUANDALINI et al. (2009). A comparação entre as Figuras 2 e 3 indica um bom

resultado da estratégia proposta neste trabalho. Em particular, destaca-se o resultado obtido na laje PG-3 de maior tamanho (espessura 500 mm e seção de 6x6 m), onde apesar da baixa taxa de armadura (0,33%) foi obtida ruptura por punção no ensaio experimental. Esse resultado está justificado pela influência do efeito escala no comportamento à tração em estruturas de concreto. Os resultados numéricos obtidos no Atena permitiram representar razoavelmente bem o comportamento da laje PG-3.

Como mencionado, a maior divergência foi observada na laje PG-6 em relação à capacidade máxima obtida. Apesar desta diferença, o modo de falha não mudou – todas continuam rompendo à punção, uma vez que a rotação máxima atingida foi baixa, portanto o resultado da simulação manteve-se condizente com os ensaios. No caso da laje PG-6, o critério da TFCC pode ser usado como um limite máximo para obter a capacidade de punção e garantir uma margem de segurança adequada dos resultados calculados da análise não linear.

CONCLUSÕES:

No presente trabalho, foi aplicada uma abordagem numérica para a determinação da punção em lajes lisas, a partir da combinação do critério da TFCC e análises numéricas baseadas em elementos finitos tipo placa. O comportamento não linear do concreto armado foi representado através do modelo constitutivo *CC3DNonLinCementitious2*, disponível no software Atena. O desempenho da estratégia

proposta foi avaliada através da comparação com ensaios experimentais reportados por GUANDALINI et al. (2009).

De forma geral, a comparação entre as capacidades máxima assim como também as rotações máximas atingidas entre as simulações e os resultados experimentais indica uma boa concordância. Os modelos numéricos conseguiram representar adequadamente a influência da taxa de armadura e do efeito escala na ruptura à punção de lajes lisas.

Encontrar um modelo constitutivo adequado para o concreto armado é um desafio significativo devido à sua complexidade. Nesse sentido, o software ATENA se apresenta como uma solução de análise de elementos finitos para simular o comportamento estrutural de lajes lisas. Como observado, a simulação numérica e o modelo constitutivo de fratura-plasticidade, *CC3DNonLinCementitious2*, ofereceu boa aproximação para os resultados experimentais e, portanto, traduz satisfatoriamente o comportamento real das lajes frente a carregamentos.

O uso de elementos finitos tipo placa permitiu uma redução do custo computacional da análise não linear, em comparação com uma análise com elementos finitos hexaédricos. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que o critério da TFCC pode ser usado como um limite máximo para obter a capacidade de punção e garantir uma margem de segurança adequada dos resultados calculados na simulação numérica.

BIBLIOGRAFIA

CERVENKA, Vladimír; JENDELE, Libor; CERVENKA, Jan. **ATENA Program Documentation. Part 1: Theory**. Praga: Cervenka Consulting, 2011. 259 p.

GUANDALINI, Stefano; BURDET, Olivier; MUTTONI, Aurelio. Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios. **ACI Structural Journal**, v. 106, n. 1, p. 87-95, 2009.

MUTTONI, Aurelio. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. **ACI structural Journal**, v. 105, n. 4, p. 440-450, 2008.

RABELLO, Fernando Toppan. **Análise comparativa de normas para a punção em lajes de concreto armado**. 248 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SANTOS, Eduardo Veloso dos. **Punção em lajes lisas: métodos de cálculo, prescrições normativas e exemplos de aplicação**. 225 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

TRAUTWEIN, Leandro Mouta. **Punção em lajes cogumelo de concreto armado: análise experimental e numérica**. 350 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.