

Estudo experimental sobre a resistência ao esforço transversal de lajes de tabuleiros de pontes em betão armado sob ações estáticas e de fadiga

Experimental campaigns on the static and fatigue shear strength of reinforced concrete deck slabs

Francisco Natário
Miguel Fernández Ruiz
Aurelio Muttoni

Resumo

Os tabuleiros de pontes em betão armado são solicitados por cargas concentradas na vizinhança das almas. O modo de rotura estático destes elementos estruturais é frequentemente o esforço transversal. No caso específico das pontes construídas por avanços sucessivos, a resistência ao esforço transversal pode ser influenciada pela presença de bainhas para cabos de pré-esforço longitudinais no interior da laje de tabuleiro.

As cargas concentradas que solicitam os tabuleiros de pontes são provenientes do tráfego de pesados e têm uma natureza repetitiva, atuando um determinado número de vezes durante a vida útil da obra e podendo desta forma originar problemas de fadiga.

Neste artigo são apresentadas duas campanhas experimentais que se debruçam sobre estas problemáticas. A influência de parâmetros como a posição da carga concentrada e a presença de bainhas de pré-esforço no interior das lajes foi investigada. Importantes redistribuições das reações lineares de apoio foram observadas antes da rotura.

Abstract

Reinforced concrete deck slabs under concentrated loads near bridge webs generally present shear failure modes. In the particular case of balanced cantilever bridges, the longitudinal prestressing ducts inside the deck slab can influence the shear strength.

The concentrated loads acting on deck slabs have a repetitive nature that can cause fatigue damage.

This paper presents two experimental campaigns on these topics. The influence of parameters such as load position and duct presence inside the deck slab has been investigated. Important linear reaction redistributions have been measured before failure.

Palavras-chave: Betão armado / Laje / Esforço transversal / Fadiga / Carga concentrada

Keywords: Reinforced concrete / Deck slab / Shear / Fatigue / Concentrated load

Francisco Natário

Synaxis SA Lausanne
Lausanne, Suisse
f.natario@synaxis.ch

Miguel Fernández Ruiz

École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit,
Laboratoire de Construction en Béton
Lausanne, Suisse
miguel.fernandezruiz@epfl.ch

Aurelio Muttoni

École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit,
Laboratoire de Construction en Béton
Lausanne, Suisse
aurelio.muttoni@epfl.ch

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

NATÁRIO, F. [et al.] – Estudo experimental sobre a resistência ao esforço transverso de lajes de tabuleiros de pontes em betão armado sob ações estáticas e de fadiga. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 17-26.

1 Introdução

As lajes em betão armado sem estribos solicitadas por cargas concentradas na vizinhança de um apoio linear são casos típicos de lajes de tabuleiros de pontes (Figura 1), lajes fungiformes que suportam paredes, ou ainda de maciços de encabeçamento de estacas. Estas estruturas são habitualmente dimensionadas ao esforço transverso e punçoamento com regras normativas que foram calibradas através de ensaios de vigas sem estribos, bandas de lajes solicitadas em toda a sua largura, ou ainda lajes isoladas apoiadas sobre um pilar, em condições axissimétricas. No entanto, estes ensaios não são representativos do comportamento das lajes solicitadas por cargas concentradas na vizinhança de um apoio linear. Esta configuração de carregamento cria nas lajes um fluxo de esforço transverso (Figura 2) que não é perfeitamente paralelo, nem perfeitamente radial, e que permite redistribuições de esforço transverso antes da rotura.

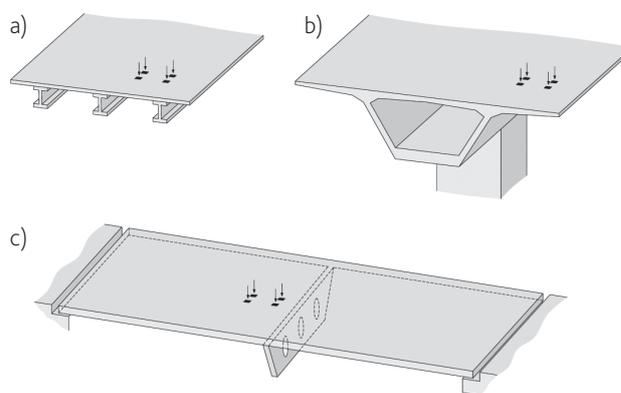


Figura 1 Lajes em betão armado sem estribos solicitadas por cargas concentradas na vizinhança de um apoio linear: (a) ponte multiviga; (b) ponte em caixão; e (c) ponte em laje

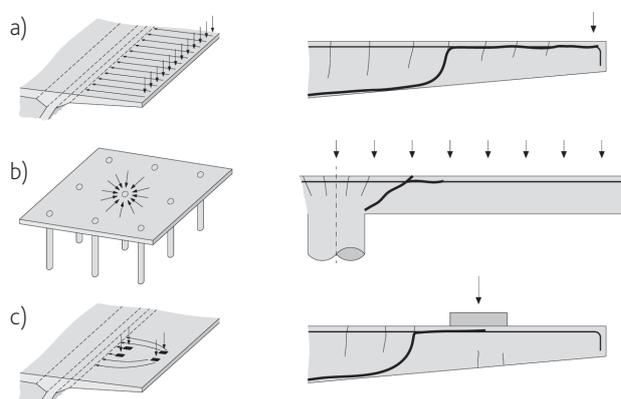


Figura 2 Modos de transmissão de esforço transverso e padrões típicos de fissuração na rotura estática: (a) fluxo de esforço transverso numa laje unidirecional; (b) fluxo de esforço transverso numa laje fungiforme; e (c) fluxo de esforço transverso numa laje solicitada por cargas concentradas na vizinhança de um apoio linear

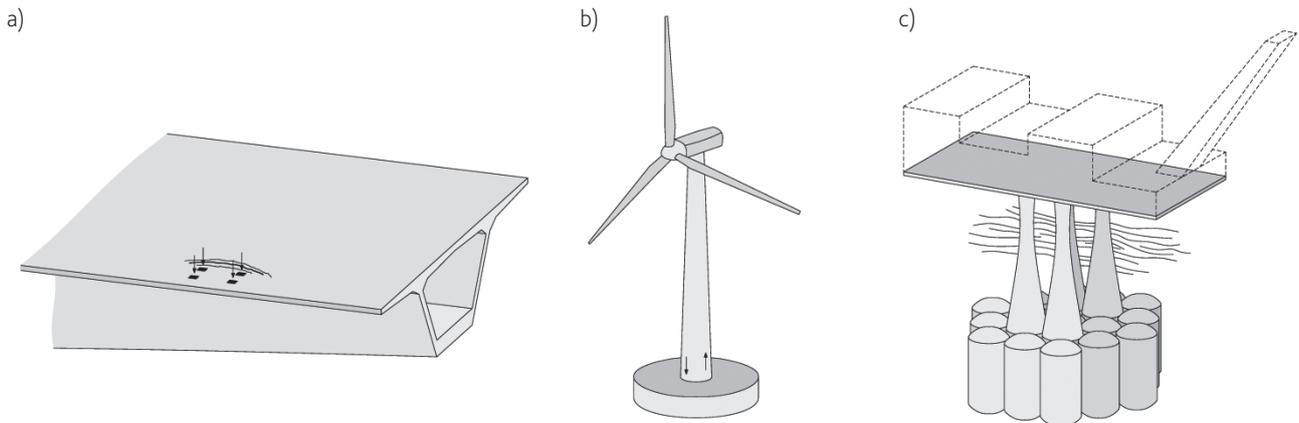


Figura 3 Exemplos de estruturas potencialmente sensíveis a fenômenos de fadiga de esforço transversal: (a) tabuleiros de pontes; (b) torres e fundações de aerogeradores; e (c) plataformas *offshore*

Por outro lado, as cargas concentradas que solicitam as lajes de tabuleiros de pontes (provenientes da ação do tráfego de pesados) são de natureza repetitiva, atuando um determinado número de vezes durante a vida útil da obra, o que pode originar problemas de fadiga. No que diz respeito à rotura de esforço transversal por fadiga de elementos em betão armado sem estribos, ela pode ser potencialmente determinante em elementos estruturais solicitados por elevadas sobrecargas de natureza repetitiva, como o tráfego, o vento ou as ondas marítimas, veja-se a Figura 3.

No caso específico de pontes construídas por avanços sucessivos, a presença de bainhas para cabos de pré-esforço longitudinais no interior da laje de tabuleiro pode também influenciar a resistência ao esforço transversal (Figura 4a). O mesmo se pode verificar em lajes fungiformes de edifícios com condutas no seu interior.

Neste trabalho são apresentadas duas campanhas experimentais. A primeira é composta por 12 ensaios estáticos de grande escala de 6 lajes em consola solicitadas por uma carga concentrada na proximidade de um apoio linear, apoio este que permite registar a evolução da reação linear durante os ensaios. A segunda campanha experimental é semelhante, e contém 4 ensaios estáticos de grande escala de duas lajes (ensaios de referência) e 11 ensaios de fadiga de 8 outras lajes idênticas.

2 Campanha de ensaios estáticos

2.1 Propriedades geométricas, materiais e do dispositivo de ensaio

Nesta campanha experimental foram efetuados doze ensaios de seis lajes à escala real (3,00 m × 3,00 m × 0,18 m) linearmente apoiadas no seu centro. Quatro parâmetros foram investigados, nomeadamente a posição da carga concentrada, o material, o diâmetro e a injeção das bainhas longitudinais. A geometria dos modelos de ensaio (Figura 4b) e as armaduras (Figura 5) foram adaptadas de um viaduto construído na Suíça em finais dos anos 60 [1], veja-se a Figura 4a.

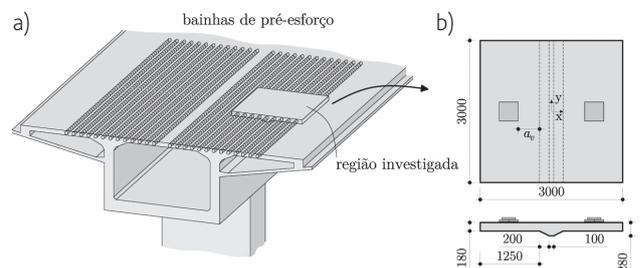


Figura 4 Lajes ensaiadas monotonicamente: (a) região investigada; e (b) geometria (dimensões em [mm])

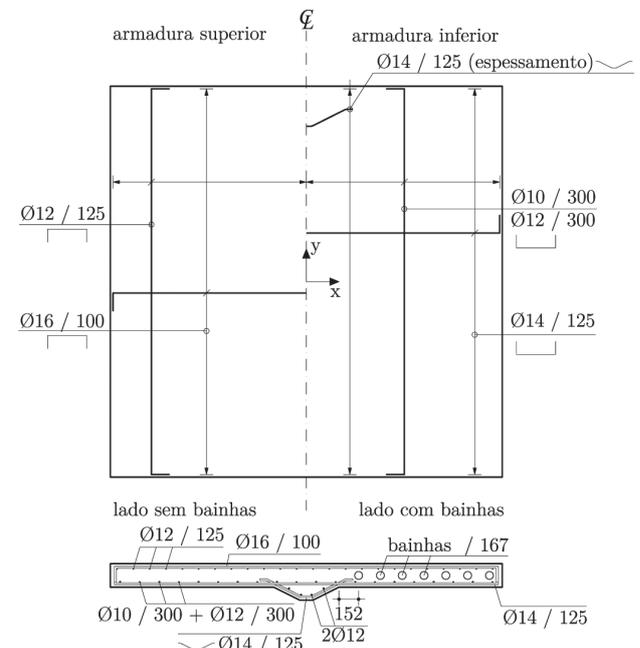


Figura 5 Armaduras dos modelos de ensaio (dimensões em [mm])

Quadro I Propriedades dos modelos de ensaio testados

Teste	a_v/d	V_{max} [kN]	Bainhas	Injeção	Diâmetro bainha [mm]	f_c [MPa]	E_c [MPa]	f_m [MPa]
SN1B	2	437	polipropileno	sim	63	28,3	26 600	50,3
SN1A	2	489	–	–	–	30,3	27 500	–
SN2B	3	341	polipropileno	sim	63	29,5	27 100	67,1
SN2A	3	330	–	–	–	30,1	27 400	–
SN3B	4	330	polipropileno	sim	63	29,7	27 200	67,8
SN3A	4	328	–	–	–	30,4	27 600	–
SN4C	2	307	aço	não	72	28,4	26 200	–
SN4D	2	494	aço	sim	72	28,8	26 900	53,6
SN5C	3	266	aço	não	72	28,5	26 400	–
SN5D	3	335	aço	sim	72	28,7	26 700	48,8
SN6C	4	234	aço	não	72	28,3	26 100	–
SN6D	4	327	aço	sim	72	28,9	27 000	54,2

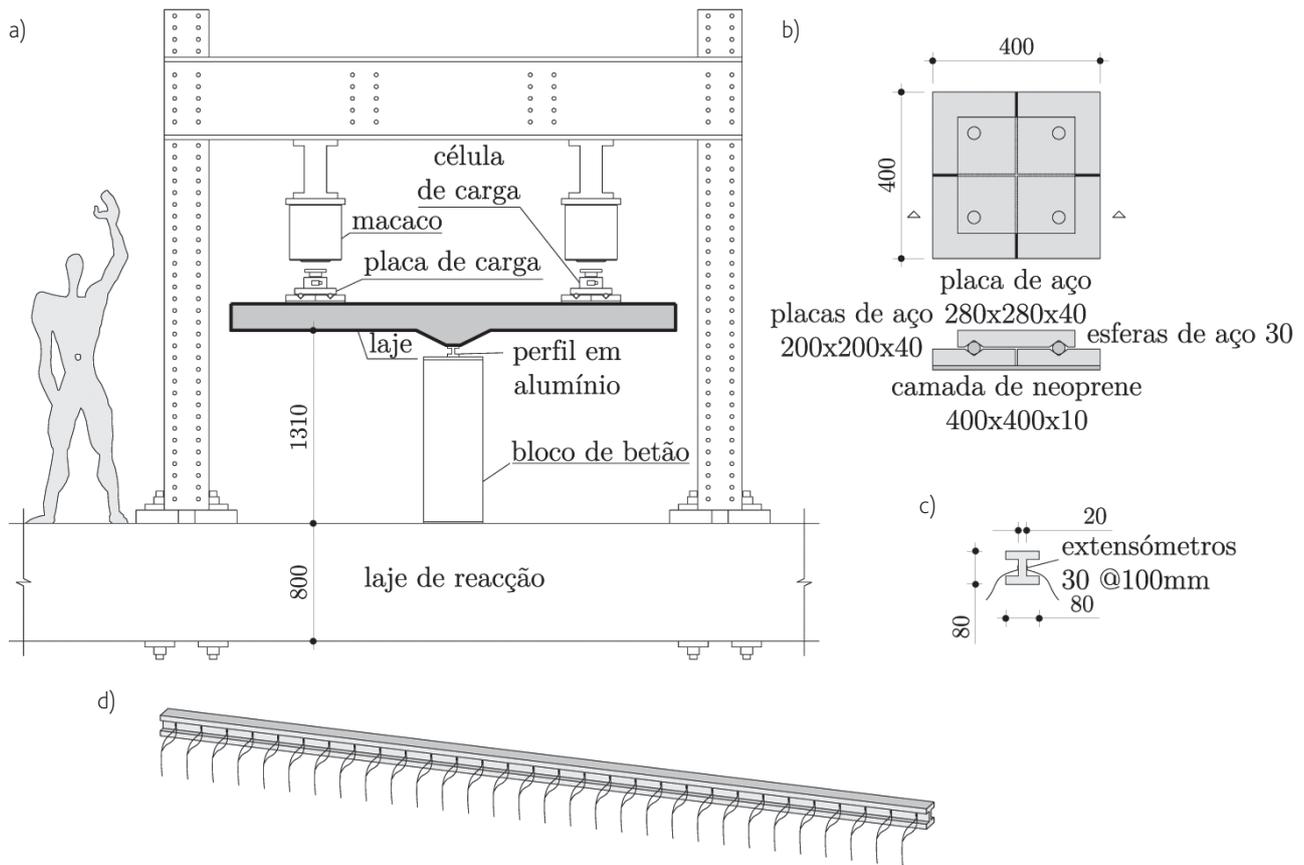


Figura 6 Dispositivo de ensaio monotónico (dimensões em [mm]): (a) alçado; (b) placas de carga; (c) secção transversal; e (d) vista tridimensional do perfil de alumínio

A Figura 6a apresenta o dispositivo de ensaio. Os modelos de ensaio apoiam-se num perfil em I de alumínio de 80 mm de altura. Em cada face da alma do perfil foram colados 30 extensómetros verticais a cada 100 mm para registar a evolução da reação linear, vejam-se as Figuras 6c e d.

Três posições de carga foram investigadas, correspondendo a uma distância livre entre o fim do espessamento e a carga (a_v) de $2d$, $3d$ e $4d$, onde d é a altura efetiva da laje (Figura 4b).

Após a rotura de um dos lados da laje procedeu-se à reparação do lado danificado, através do fechamento da fissura crítica por intermédio de barras verticais pré-esforçadas e perfis e placas de aço dispostos nas faces superior e inferior das lajes.

O Quadro I apresenta as principais características de cada ensaio, a resistência à compressão (f_c) e o módulo de elasticidade do betão (E_c) medidos em cilindros, e ainda a resistência à compressão da calda de injeção das bainhas (f_m) medida em cubos. A máxima dimensão dos agregados é de 32 mm. As armaduras utilizadas eram do tipo A500NR SD.

2.2 Principais resultados

As curvas carga-deslocamento de alguns ensaios representativos medidas no centro das placas de carga são apresentadas na Figura 7c. Em todos os casos, exceto nas lajes com bainhas em aço não injetadas, após ter-se atingido o pico de carga, as lajes apresentaram um comportamento de amolecimento, com uma diminuição significativa da carga aplicada com o aumento do deslocamento. As lajes com bainhas em aço não injetadas apresentaram um patamar onde o deslocamento pôde ser aumentado mantendo a carga atuante sensivelmente constante.

Os padrões de fissuração nos cortes centrais das lajes são apresentados na Figura 7a, e a fissuração das faces superior e inferior do modelo de ensaio representativo SN2 encontra-se representado na Figura 7b. Todas as lajes apresentaram um padrão de fissuração na face superior que se desenvolveu paralelamente ao apoio linear na zona central. Na face inferior a fissuração foi sobretudo perpendicular ao apoio e concentrada sob a carga. O padrão de fissuração observado no corte central das lajes sem bainhas e com bainhas injetadas é semelhante ao padrão de fissuração de vigas sem estribos com rotura ao esforço transversal. Para as esbeltezas de esforço transversal mais elevadas ($a_v/d = 3$ e 4), a fissura crítica de esforço transversal desenvolve-se de maneira praticamente horizontal na zona comprimida (parte inferior) na proximidade do espessamento. Nestes casos a fissura crítica intercepta a armadura superior com um ângulo bastante inclinado a uma distância de sensivelmente d da placa de carga. O esboroamento do betão nesta zona é devido ao efeito ferrolho da armadura principal. Para esbeltezas de esforço transversal menores

($a_v/d = 2$), a fissura crítica é mais inclinada e retilínea em termos médios, e intercepta a armadura superior mais perto da placa de carga. Nas lajes com bainhas não injetadas, o padrão de fissuração desenvolveu-se de maneira distinta, horizontalmente ao longo das armaduras inferiores e superiores.

As cargas máximas atingidas em cada ensaio são apresentadas no Quadro I e na Figura 7d. Nenhuma diferença significativa de resistência foi observada entre as lajes com bainhas injetadas e sem bainhas. Já no que diz respeito às lajes com bainhas não injetadas, a resistência foi em média 26% inferior à resistência das lajes de referência sem bainhas. A comparação entre as resistências de todos os ensaios é apresentada na Figura 7d, normalizadas com a raiz quadrada da resistência à compressão do betão f_c e o quadrado de d . Os resultados mostram que a resistência normalizada ao esforço transversal diminuiu com o aumento da esbelteza de esforço transversal a_v/d , apesar de que o esforço transversal unitário atuante deve ser mais elevado para valores mais reduzidos de a_v/d . Este resultado é bastante interessante, pois põe em evidência a influência do apoio direto (resistência elevada para os ensaios com $a_v/d = 2$), mas também a influência dos momentos flectores atuantes na resistência ao esforço transversal. Esta última influência pode ser constatada nos ensaios com $a_v/d = 3$ e 4 (ambos com apoio direto muito limitado ou mesmo inexistente).

A reação linear de cada ensaio pôde ser calculada através das medidas da deformação vertical média da alma do perfil de alumínio, em cada uma das 30 localizações dos extensómetros, assumindo-se para tal um comportamento elástico linear do alumínio e considerando uma distribuição constante da deformação na área contributiva de cada extensómetro. A medição da reação total R_{tot} correspondeu bem à força total aplicada V_{tot} , com erros relativos aquando da aplicação da carga máxima de menos de 5% em todos os ensaios, exceto o ensaio SN6 (onde se situou abaixo de 10%). As medições das reações lineares não foram efetuadas no segundo teste (após reparação do lado danificado das lajes), uma vez que o fluxo de esforço transversal na zona reforçada é potencialmente influenciado pelos elementos de reforço. A reação linear medida é apresentada na Figura 7 para um caso representativo. Esta figura mostra uma clara e importante redistribuição das reações lineares antes da rotura. Para valores reduzidos da carga aplicada, a reação concentra-se maioritariamente na zona próxima da carga. Com o aumento da carga aplicada (em especial após se ter atingido 60% da carga máxima aplicada), a reação na região central aumenta a uma velocidade menor ou eventualmente diminuiu, transferindo carga para as regiões adjacentes.

Mais detalhes sobre esta campanha experimental podem ser consultados em [2;3].

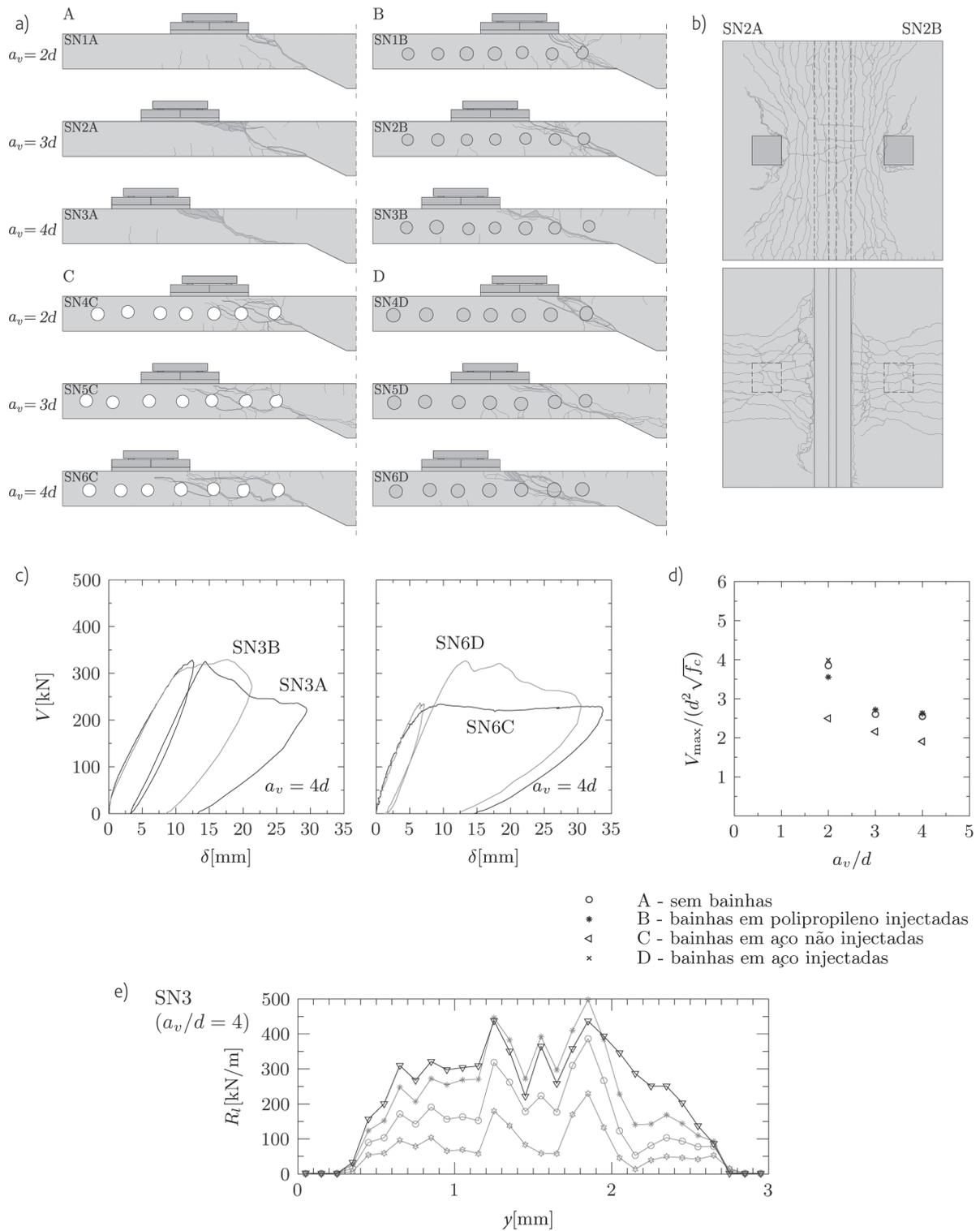


Figura 7 Principais resultados da campanha de ensaios estáticos: (a) cortes centrais de todos os espécimes; (b) fissuração nas faces superior e inferior do modelo de ensaio SN2; (c) diagramas carga-deslocamento no centro da placa de carga para os ensaios com $a_v/d = 4$; (d) resistências normalizadas de todos os ensaios; e (e) evolução da reação linear no primeiro teste do modelo de ensaio SN3

3 Campanha de ensaios de fadiga

3.1 Propriedades geométricas, materiais e do dispositivo de ensaio

Na literatura científica (do conhecimento do autor) não existem ensaios de fadiga em lajes em consola de betão armado sem estribos solicitadas por cargas concentradas, cujo comportamento mecânico difere significativamente de lajes simplesmente apoiadas. Por forma a produzir ensaios experimentais deste tipo, uma campanha experimental foi desenvolvida pelos autores. Os modelos de ensaio testados são lajes à escala real (3,00 m x 3,00 m x 0,25 m) apoiados linearmente no seu centro e solicitados por uma carga concentrada de cada lado da laje. Quatro testes estáticos foram realizados em duas lajes (dois por laje e posição de carga) e onze testes de fadiga em oito lajes (quatro lajes por posição de carga).

Dez lajes foram testadas, numeradas de FN1 a FN10. As lajes apenas contêm armadura de flexão. A Figura 8 apresenta a geometria e as armaduras dos modelos de ensaio.

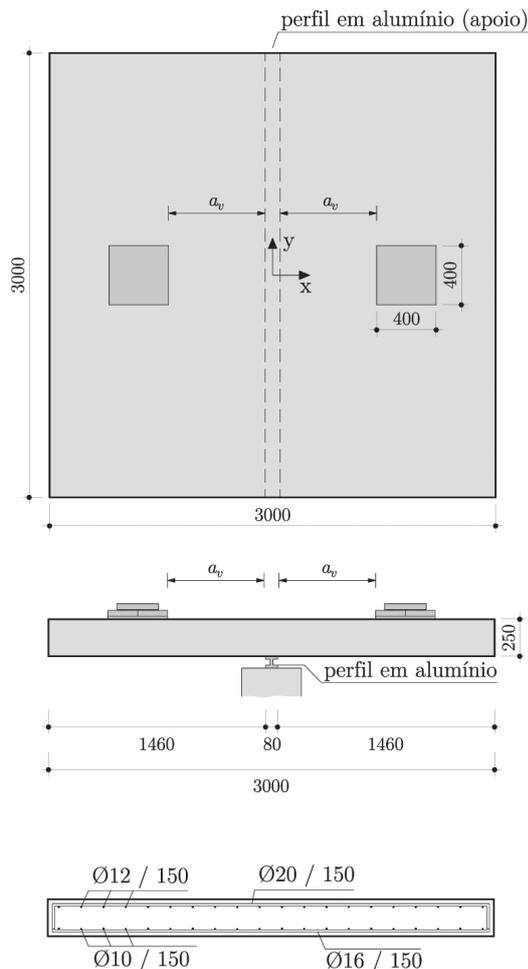


Figura 8 Geometria e armaduras das lajes ensaiadas (dimensões em [mm])

No Quadro II são apresentadas as principais características dos ensaios. A máxima dimensão dos agregados é de 16 mm. As armaduras utilizadas eram do tipo A500NR SD, sendo as armaduras principais de flexão (20 mm de diâmetro) de aço temperado e revenido. O dispositivo de ensaio era semelhante ao que já foi previamente descrito no capítulo anterior.

Dois posições de cargas distintas foram investigadas, correspondendo a uma distância livre entre os apoios e a carga (a_v) de 440 mm e 680 mm (Figura 8) (2.1d e 3.2d respetivamente, onde d é a altura efetiva da laje).

Após se ter atingido a rotura de um dos lados da laje, procedeu-se à reparação da mesma, tal como efetuado na campanha experimental estática, e continuou-se o ensaio.

Dois lajes foram testadas estaticamente por forma a obter as resistências estáticas de referência (V_{Ref}) para cada posição de carga. Cada laje contribuiu com dois testes de referência (valores duplicados). O carregamento em fadiga das restantes lajes foi efetuado num modo misto de controlo de força e deslocamento. A força média dos dois macacos foi variada entre dois limites constantes ao longo do ensaio e cada força foi corrigida individualmente de maneira a impedir um deslocamento vertical relativo entre os dois macacos de mais de 10 mm. As diferenças relativas entre as cargas máximas aplicadas em ambos os lados de cada laje foram menores que 1% em cinco lajes (FN3 e FN7-FN10), entre 2-3% para outras duas lajes (FN2 e FN4), e 3,1% na restante (FN5). O rácio R desejado entre a carga mínima (V_{min}) e máxima (V_{max}) era de 0,10, e os valores registados variaram entre 0,09-0,12, veja-se o Quadro II. Estes valores de R são razoáveis, uma vez que as cargas de tráfego apresentam um valor R de 0,0, mas o peso próprio da estrutura está sempre a atuar. Uma representação qualitativa do histórico de carregamento dos ensaios de fadiga é dada na Figura 9.

Para cada posição de carga foram ensaiados quatro níveis de carga (LL). A carga máxima aplicada foi corrigida para considerar as diferentes resistências à compressão do betão dos vários modelos de ensaio, de acordo com a expressão $V_{max} = LL V_{Ref} (f_c / f_{c,Ref})^{0,5}$, onde V_{Ref} é a resistência estática média dos dois ensaios de referência, f_c é a resistência à compressão do betão no dia de início do ensaio, e $f_{c,Ref}$ é a resistência média do betão dos dois ensaios de referência. Para a distância livre entre o apoio e a carga $a_v = 680$ mm, os níveis de carga alvo foram de 60, 70, 80 e 90%, e para $a_v = 440$ mm, 80, 85, 90 e 95%. O carregamento sinusoidal de fadiga foi aplicado a uma frequência de 1 Hz, e em alguns modelos de ensaio a 0,75 Hz e 0,5 Hz próximo da rotura (FN9 e FN10, devido ao débito hidráulico requerido pelos macacos (relacionado com os grandes deslocamentos da laje)).

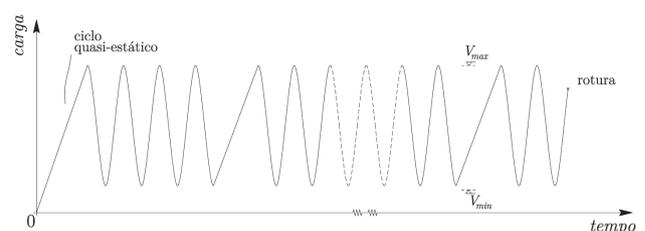


Figura 9 Representação qualitativa do carregamento de fadiga

Quadro II Principais propriedades dos modelos de ensaio testados

Laje	Lado	a_v [mm]	Tipo	V_{max} [kN]	V_{min} [kN]	LL	Ciclos	MR*	f_c [MPa]	E_c [MPa]
FN1	W	440	estático	591	-	-	1	ET	45,2	33 000
FN1	E	440	estático	597	-	-	1	ET	46,6	34 000
FN2	W	440	fadiga	520	53	96	1350	ET	38,2	30 500
FN2	E	440	fadiga	506	54	93	990	ET	38,2	30 500
FN3	W	440	fadiga	473	48	90	72 340	ET	36,2	30 000
FN3	E	440	fadiga	472	48	90	72 340	ET	36,2	30 000
FN4	W	440	fadiga	467	47	86	17 300	ET	38,4	30 500
FN4	E	440	fadiga	456	49	84	15 560	ET	38,4	30 500
FN5	W	440	fadiga	394	36	79	501 810	RBA	32,3	28 000
FN5	E	440	fadiga	382	44	77	501 810	RBAET	32,3	28 000
FN6	W	680	estático	474	-	-	1	ET	45,7	33 000
FN6	E	680	estático	499	-	-	1	ET	46,5	34 000
FN7	W	680	fadiga	427	46	89	824	ET	44,8	35 000
FN7	E	680	fadiga	427	46	89	824	ET	44,8	35 000
FN8	W	680	fadiga	378	42	80	5 007	ET	43,5	34 500
FN8	E	680	fadiga	376	42	80	5 193	ET	43,5	34 500
FN9	W	680	fadiga	333	35	70	311 200	ET	44,7	35 000
FN9	E	680	fadiga	334	38	70	311 200	RBA	44,7	35 000
FN10	W	680	fadiga	281	30	59	734 760	RBAET	43,7	34 500
FN11	E	680	fadiga	282	30	60	734 760	RBAET	43,7	34 500

* MR – modo de rotura; ET – esforço transversal; RBA – rotura de barras de armadura; RBAET – rotura de barras de armadura seguidas de rotura de esforço transversal

3.2 Principais resultados

Os modelos de ensaio testados estaticamente (ensaios de referência) apresentaram roturas ao esforço transversal, tal e qual os ensaios da campanha experimental estática. O Quadro II apresenta as cargas máximas atingidas em todos os ensaios estáticos.

Todas as lajes ensaiadas em fadiga apresentaram roturas de esforço transversal sem roturas de barras de armadura, excetuando as lajes FN5 ($a_v = 440$ mm; LL = 80%), FN9 ($a_v = 680$ mm; LL = 70%) e FN10 ($a_v = 680$ mm; LL = 60%). O Quadro II apresenta os principais resultados da campanha experimental, e a Figura 10 os diagramas de Wöhler para cada posição de carga, normalizados pelas cargas médias de rotura dos ensaios estáticos de referência. O rácio entre a carga máxima aplicada (resistência de fadiga) e a resistência estática correspondente foram normalizados com a raiz quadrada da resistência à compressão do betão $(f_{c,Ref}/f_{c,jat})^{0.5}$.

As lajes que se romperam ao esforço transversal sem rotura de armaduras apresentaram um padrão de fissuração similar aos obtidos nos ensaios estáticos. Já as lajes que exibiram rotura de

barras de armadura eventualmente também se romperam ao esforço transversal (exceto FN9-W), dado que as grandes aberturas das fissuras de flexão se propagaram e originaram uma fissura crítica de esforço transversal. Os ensaios com $a_v = 680$ mm que exibiram roturas de barras de armadura apresentaram oito roturas das barras transversais de diâmetro 20 mm localizadas na face superior sobre o apoio linear, bem como algumas barras longitudinais de 10 mm na face inferior, desenvolvendo desta forma um mecanismo completo de flexão, veja-se a Figura 11. O ensaio com $a_v = 440$ mm que apresentou roturas de barras é distinto dos casos com $a_v = 680$ mm. Três barras de 20 mm romperam-se entre o apoio e a placa de carga, na intersecção entre a fissura crítica de esforço transversal, que se desenvolveu da propagação de uma fissura de flexão, não resultando daí um mecanismo de flexão. O efeito ferrolho pode ter gerado um acréscimo de tensão nas barras devido à flexão local das armaduras, que por sua vez terá contribuído para o acelerar do processo de fadiga neste local das barras. Todas as barras que se romperam em fadiga foram extraídas dos modelos de ensaio após o fim dos testes, por forma a confirmar os locais de rotura das barras.

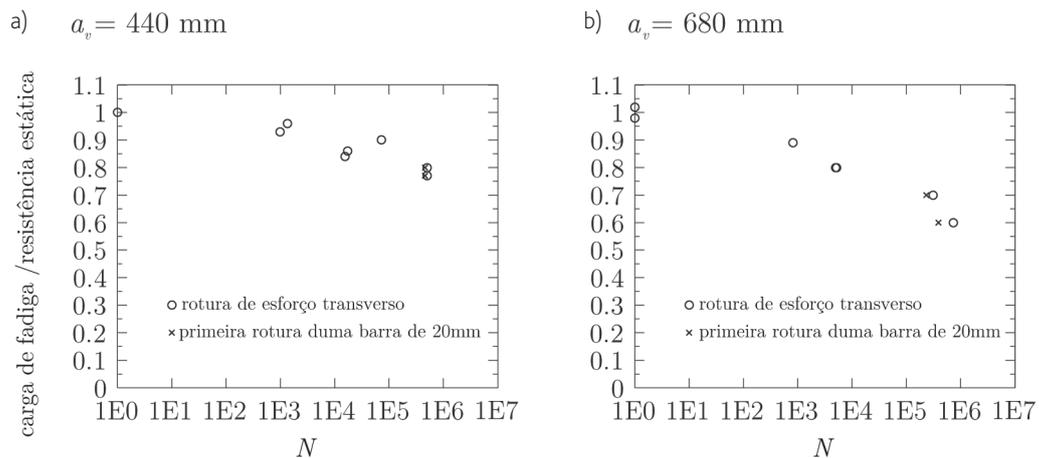


Figura 10 Diagrama de Wöhler das lajes ensaiadas: (a) $a_v = 440$ mm; e (b) $a_v = 680$ mm

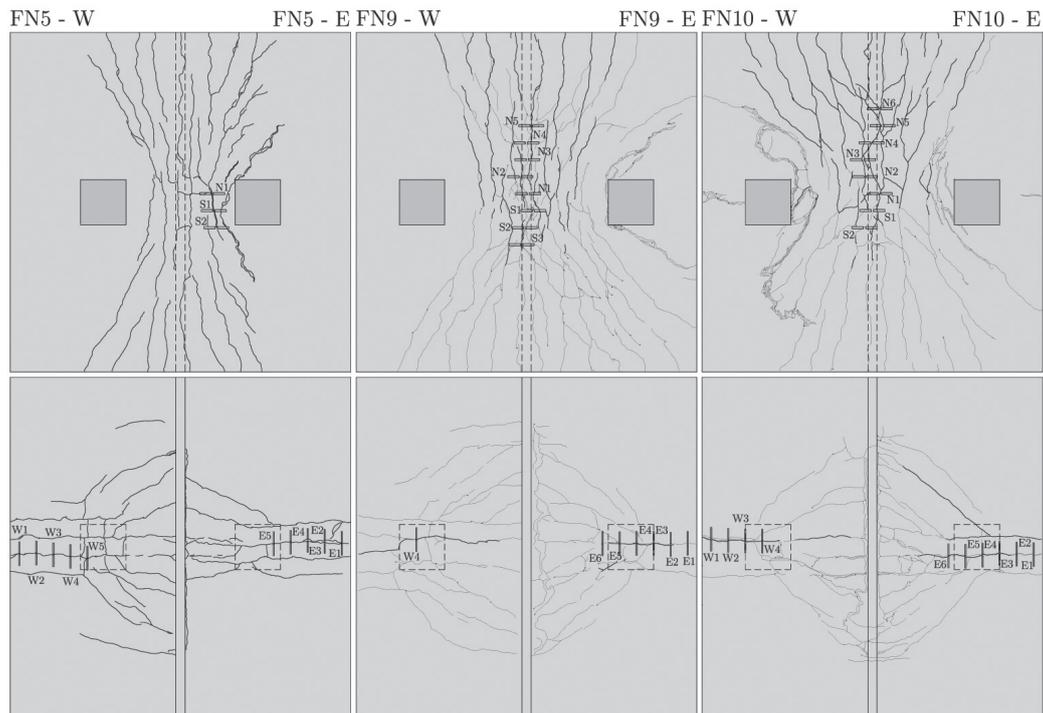


Figura 11 Padrões de fissuração e localização das fraturas de armaduras

As lajes FN9 e FN10 ($a_v = 680$ mm), que desenvolveram um mecanismo completo de flexão, apresentaram uma vida residual considerável, que corresponde a 24,5% e 46,9% da vida total, respetivamente. Quanto à laje FN5 ($a_v = 440$ mm), cuja rotura está provavelmente associada ao efeito ferrolho, ela apenas apresentou uma vida residual que corresponde a 8,3% da vida total do modelo de ensaio.

Mais detalhes sobre esta campanha experimental podem ser consultados em [2;4].

4 Conclusões

Em relação aos ensaios estáticos de lajes em betão armado em consola solicitadas por cargas concentradas na vizinhança de um apoio linear, as principais conclusões dos trabalhos efetuados são:

- 1) Os ensaios estáticos demonstraram que as roturas ao esforço transversal são o modo de rotura de todos os modelos de ensaio investigados, independentemente da posição da carga concentrada e do tipo e injeção das bainhas longitudinais de

pré-esforço. Esta constatação é coerente com o padrão de fissuração observado no corte central das lajes ensaiadas;

- 2) Redistribuições de esforços foram observadas antes da rotura, devidas ao surgimento de uma fissura de esforço transversal na região entre a carga concentrada e o apoio linear;
- 3) O comportamento bidirecional das lajes está na base da razão pela qual os ensaios em vigas sem estribos não são representativos do comportamento de lajes de tabuleiro de pontes;
- 4) Não foram observadas diferenças significativas de resistência entre as lajes normais de betão armado e as lajes com bainhas longitudinais injetadas. No caso em que as bainhas não estavam injetadas, a resistência ao esforço transversal foi significativamente reduzida.

Quanto aos ensaios de fadiga realizados:

- 1) O carregamento de fadiga de lajes em consola solicitadas por cargas concentradas diminuiu a resistência ao esforço transversal;
- 2) Antes da rotura provocada pelo carregamento de fadiga foram observadas redistribuições de esforços;
- 3) As redistribuições de esforços são favoráveis ao aumento da resistência ao esforço transversal quando comparadas com vigas sem estribos equivalentes com roturas ao esforço transversal em fadiga;
- 4) As roturas ao esforço transversal de fadiga sem rotura de barras de armadura apenas ocorrem para cargas máximas aplicadas elevadas;
- 5) As roturas ao esforço transversal após a rotura de barras de armadura ocorrem após um número importante de ciclos depois da rotura da primeira barra;
- 6) As lajes que apresentam roturas de barra acabam por se romper ao esforço transversal.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio e financiamento do Gabinete Federal das Estradas da Suíça e a gentil oferta das bainhas utilizadas nas campanhas experimentais pela empresa VSL (Suisse).

Referências

- [1] Bureau Technique PIGUET S.A. – "The viaducts of Chillon (Switzerland)" (em Francês), *La Technique des Travaux*, pp. 47-60, No. 327, 1971.
- [2] Natário, F. – *Static and fatigue shear strength of reinforced concrete slabs under concentrated loads near linear supports*, PhD Thesis, EPFL thesis n.º 6670, Lausanne, Switzerland, 2015, 201 p.
- [3] Natário, F.; Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A. – "Shear strength of RC slabs under concentrated loads near clamped linear supports", *Engineering Structures*, Vol. 76, pp. 10-23, 2014.
- [4] Natário, F.; Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A. – "Experimental investigation on fatigue of concrete cantilever bridge deck slabs subjected to concentrated loads", *Engineering Structures*, Vol. 89, pp. 191-203, 2015.