



Congresso de
Construção Metálica
e Mista

Luís Simões da Silva | Elsa Caetano | Paulo Piloto
Carlos Martins | Tiago Abecasis



COMPORTAMENTO DE CONECTORES DE TIPO PERNO INSERIDOS EM LAJES MACIÇAS DE BETÃO LEVE E SUJEITOS A CARREGAMENTOS CÍCLICOS

Isabel Valente e Paulo J. S. Cruz

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Resumo. Nesta comunicação é apresentado o programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas de Eng^a Civil da Universidade do Minho com vista ao estudo da conexão aço-betão leve submetida a carregamentos cíclicos. Trata-se de um conjunto de ensaios do tipo *push-out* sobre provetes com lajes realizadas em betão leve, utilizando conectores do tipo perno de cabeça. Os ensaios são realizados com controlo de força, sendo medidos valores da carga aplicada e de deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de betão armado. Procura-se analisar o comportamento da conexão e avaliar os parâmetros mais influentes: carga máxima de ensaio, capacidade de deformação, ductilidade ou ainda evolução do deslizamento aço-betão leve em função do nº de ciclos e da amplitude de carga.

1 Introdução

O estudo dos fenómenos de fadiga na conexão entre aço e betão tem sido realizado com recurso a ensaios de tipo *push-out* ou a ensaios em vigas mistas em que é aplicado um elevado número de ciclos de carga e descarga. O objectivo deste tipo de ensaios tem sido avaliar o número de ciclos de carga necessário para se verificar a rotura, geralmente quando o nível de carga está entre 40% e 60% da carga de rotura obtida num ensaio monotónico, ou ainda avaliar a capacidade de carga existente, após a aplicação de um determinado número de ciclos de carga. O número de ciclos necessário para que ocorra uma rotura por fadiga da conexão está geralmente na gama dos milhares ou milhões de ciclos de carga. Estudos anteriores, como os que foram realizados por [1-5] comprovaram que os conectores de tipo perno submetidos a carregamentos repetidos vêm a sua capacidade resistente significativamente reduzida.

Hanswille et al. [6] testaram um total de 71 provetes de tipo *push-out* para determinar a redução da capacidade resistente da conexão que se verifica após a aplicação de ciclos de carga de elevada amplitude e também para examinar os efeitos da sequência de carregamento na resistência à fadiga. Os ensaios realizados indicam que se inicia uma fendilhação precoce, aproximadamente entre os 10% e os 20% da resistência à fadiga, o que conduz a uma redução da capacidade resistente do conector. Os ensaios realizados sob amplitude constante mostraram que o máximo valor de carga aplicado durante os ciclos de carga e descarga, P_{max} , tem grande importância no tipo de fendas que se desenvolvem na base do conector.

2 O ensaio de tipo *Push-out* para carregamentos monotónicos e cíclicos

O estudo experimental do comportamento da conexão entre aço e betão, sujeita a carregamentos cíclicos é realizada por meio do ensaio de tipo *push-out*. Este tipo de ensaio proporciona uma análise rigorosa do comportamento da conexão pois permite conhecer a relação entre carga aplicada e deslizamento relativo entre as secções de aço e de betão, ao longo de todo o carregamento, bem como identificar os mecanismos de rotura associados. Este ensaio, simula de forma adequada o fluxo de forças que se desenvolve ao longo da laje de betão, numa viga mista, e é especialmente adequado para analisar a capacidade de carga dos conectores utilizados.

O ensaio referido segue as disposições descritas na EN 1994-1-1 [7], sendo consideradas algumas alterações nas dimensões dos provetes. A regulamentação [7] refere que o ensaio de tipo *push-out* também é adequado para a aplicação de carregamentos cíclicos.

O ensaio de tipo *push-out* tem sido utilizado em provetes fabricados com betão normal e conectores de tipo perno. Na campanha experimental aqui descrita utilizam-se provetes fabricados com betão leve de elevada resistência e conectores de tipo perno. As lajes são maciças. Para efeitos de comparação, são realizados ensaios sob carregamento monotónico e cíclico.

2.1 Programa de ensaios e procedimentos

Neste programa experimental são considerados seis provetes. Destes, dois são testados sob carregamento monotónico para avaliar a capacidade resistente da conexão e a respectiva curva de carga-deslizamento, e os restantes quatro são testados sob carregamento cíclico, de acordo com as características descritas na tabela 1. Em geral, todos os ensaios são conduzidos de acordo com os seguintes passos:

1. O sistema aplica N ciclos de carga e descarga entre os valores extremos de um intervalo pré-definido.
2. Após a fase de carregamento cíclico, o sistema aplica um carregamento monotónico controlado por um deslizamento de 0.002 mm/s, que se mantém até que um total de 6 mm de deslizamento se tenha verificado. Este passo é cumprido apenas para os provetes CN13.3 and CN13.4.
3. O sistema aplica um carregamento monotónico controlado pelo andamento do actuador, com uma velocidade de 0.01 mm/s, até que se dê a rotura do provete.

Na tabela 1, P_{esperado} refere-se ao valor previsto para a capacidade de carga da conexão (sob carregamento monotónico), antes de qualquer ensaio ter sido realizado. Este valor é necessário para estabelecer o intervalo de carga adequado para os 25 ciclos de carga e descarga a efectuar na fase inicial do ensaio monotónico (entre 5% e 40% de P_{esperado}). Na mesma tabela, P_{min} é o valor mínimo dos dois máximos valores de carga, determinados nos ensaios monotónicos de CN13.1 e CN13.2. Este valor é considerado igual a 50.0 kN, embora o valor determinado experimentalmente, nesses dois provetes, seja um pouco superior (ver tabela 4).

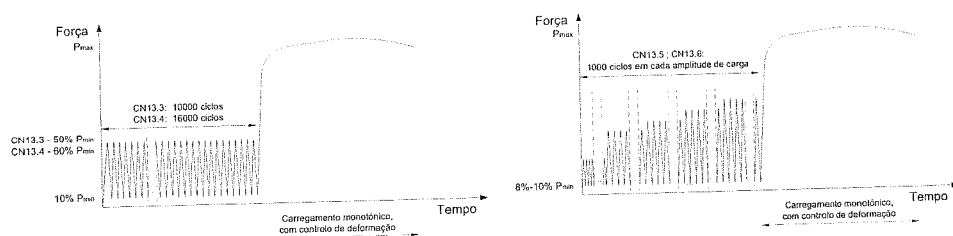
Para os provetes CN13.3 e CN13.4, são aplicados ciclos de carga de valor constante ao longo de todo o ensaio, enquanto que para os provetes CN13.5 e CN13.6, o intervalo de carga é incrementado ao fim de cada grupo de 1000 ciclos (ver Fig. 1). Os valores de frequência definidos para a lei de carga sinusoidal são de valor reduzido e dependem do intervalo de carga a aplicar.

2.2 Fabricação dos provetes de ensaio

De forma a betonar as duas lajes em posição horizontal, foi decidido betonar uma das lajes e em seguida, passados 3 dias, virar o provete e betonar a 2ª laje (ver Fig. 2).

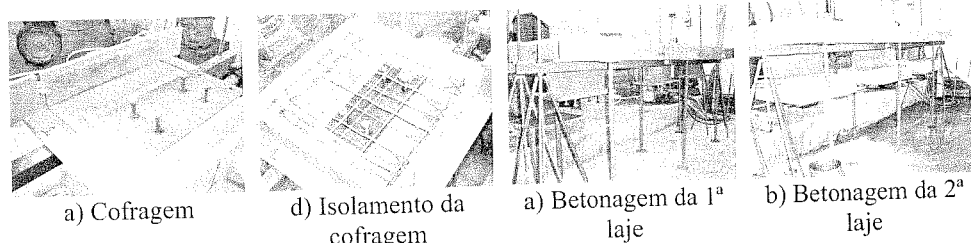
Tabela 1: Programa experimental para ensaios cíclicos de tipo *push-out*

Provete	Carregamento	Intervalo de carga previsto	Intervalo de carga nominal	Ciclos (N)	Velocidade de carga/descarga	Carregamento monotónico até à rotura, após N ciclos
CN13.1	monotónico	5-40% $P_{esperado}$	1.5 – 26.25	25	Carga / Desc. = 5 kN/s	Sim
CN13.2	monotónico	5-40% $P_{esperado}$	1.5 – 26.25	25	Carga / Desc. = 5 kN/s	Sim
CN13.3	cíclico	10-50% P_{min}	5.0 – 25.0	10000	Sinusoidal: $f=0.125$ Hz	Sim
CN13.4	cíclico	10-60% P_{min}	5.0 – 30.0	16000	Sinusoidal: $f=0.125$ Hz	Sim
CN13.5	cíclico	8-24% P_{min}	4.0 – 12.0	1000	Sinusoidal: $f=0.25$ Hz	Sim
		8-48% P_{min}	4.0 – 24.0	1000	Sinusoidal: $f=0.20$ Hz	
		8-60% P_{min}	4.0 – 30.0	1000	Sinusoidal: $f=0.125$ Hz	
		8-72% P_{min}	4.0 – 36.0	1000	Sinusoidal: $f=0.125$ Hz	
		8-80% P_{min}	4.0 – 40.0	1000	Sinusoidal: $f=0.10$ Hz	
CN13.6	cíclico	10-31.2% P_{min}	5.0 – 15.625	1000	Sinusoidal: $f=0.25$ Hz	Não
		10-62.5% P_{min}	5.0 – 31.25	1000	Sinusoidal: $f=0.20$ Hz	
		10-78.8% P_{min}	5.0 – 39.375	1000	Sinusoidal: $f=0.125$ Hz	
		10-95% P_{min}	5.0 – 47.5	1000	Sinusoidal: $f=0.10$ Hz	



a) Intervalo de carga de valor constante

b) Intervalo de carga de valor variável

Fig. 1: Sequência de carregamento para os ensaios cíclicos de tipo *push-out*

a) Cofragem

d) Isolamento da cofragem

a) Betonagem da 1ª laje

b) Betonagem da 2ª laje

Fig. 2: Condições de betonagem dos provetes

Esta decisão foi tomada, tendo em conta: a experiência entretanto adquirida em produzir betões leves com características muito constantes entre betonagens, e com o facto de o betão leve apresentar uma evolução da resistência à compressão que é muito lenta após os 28 dias. A partir dessa idade, uma diferença de 3 dias na idade do betão não tem relevância.

2.3 Propriedades dos materiais

Os provetes testados foram realizados com um betão leve de elevada resistência previamente estudado. Foram realizadas quatro betonagens onde foram betonados os provetes de tipo de ensaio e também provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade apresentados na tabela 2 foram determinados nos provetes cilíndricos, para todas as betonagens, no dia do respectivo

teste de tipo *push-out*. Tal como seria de esperar, as propriedades deste betão não são exactamente iguais para todas elas. Apesar disso, considera-se que as pequenas diferenças encontradas não são relevantes.

Tabela 2: Propriedades do betão leve utilizado nos provetes de tipo *push-out*

Betão	Provetes	Massa volúmica (kg/m ³)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (MPa)
BL44	Laje 1 de: CN13.1, CN13.2 e CN13.6	1937	56.65	23.73
BL45	Laje 2 de: CN13.1, CN13.2 e CN13.6	1860	54.04	22.38
BL46	Laje 1 de: CN13.3, CN13.4 e CN13.5	1920	63.79	25.78
BL47	Laje 2 de: CN13.3, CN13.4 e CN13.5	1912	63.34	25.33

2.4 Configuração dos provetes de ensaio

Todos os provetes utilizados nos ensaios de tipo *push-out* respeitam a configuração e dimensões representadas na Fig. 3. Os conectores utilizados são de tipo perno, com 13 mm de diâmetro.

Os provetes consistem em duas lajes de betão leve, colocadas na posição vertical e um perfil metálico do tipo HEB260, posicionado entre elas. Os pernos de cabeça são soldados ao perfil metálico e ficam betonados nas lajes de betão leve. As lajes apresentam as seguintes dimensões: 450 mm × 450 mm × 100 mm. As armaduras utilizadas em cada laje de betão correspondem a duas camadas de varões com diâmetro igual a 5 mm, de acordo com os espaçamentos representados na Fig. 3.

A decisão de não utilizar as dimensões standard propostas na EN 1994-1-1 é justificada pelas reduzidas dimensões dos pernos utilizados e foi sujeita a confirmação através de um cálculo específico. A utilização de lajes mais pequenas permite utilizar uma menor quantidade de betão e reduzir significativamente o peso dos provetes.

Foram colocados 4 transdutores de deslocamento (LVDT's), de forma a medir o deslizamento entre o perfil metálico e a laje de betão em ambas as lajes (ver Fig. 4). Estes LVDT's possuem um curso reduzido (5 mm) e uma elevada precisão, de forma a garantir que os pequenos valores de deslizamento que ocorrem durante os ciclos de carga e descarga possam ser registados. Os resultados de deslizamento que se apresentam correspondem ao valor médio das medidas obtidas pelos quatro transdutores colocados.

3 Resultados experimentais para carregamentos monotónicos

A rotura por corte dos conectores foi observada em ambos os provetes com pernos de 13 mm de diâmetro, ensaiados sob carregamento monotónico. A Fig. 4 apresenta as curvas de força-deslizamento obtidas durante os respectivos ensaios. Os dois provetes são idênticos e apresentam curvas de força-deslizamento com evolução muito similar.

As curvas representadas na Fig. 4 mostram uma relação quase linear entre força e deslizamento na fase inicial do carregamento, até cerca de 60 a 65% do valor de carga máxima posteriormente atingido durante o ensaio. Ambos os provetes apresentam evolução semelhante nesta fase do ensaio. Após o limite referido, em ambas as curvas de força-deslizamento se desenvolvem maiores valores de deslizamento, para acréscimos de força pequenos.

A tabela 3 apresenta o valor máximo de carga atingido em cada provete, $P_{u,i}$, depois de dividido pelo nº de conectores existentes no provete. A capacidade de carga da conexão é definida a partir do mínimo valor de $P_{u,i}$, obtido num conjunto de provetes similares. O valor

característico da capacidade de carga da conexão é definido por P_k , que corresponde a 90% do valor de P_u . O valor de P_k permite definir o valor do deslizamento elástico, $s_{elast,i}$, em cada ensaio, considerando que o deslizamento elástico corresponde ao deslizamento medido quando $P < P_k$. O deslizamento plástico, corresponde à zona em que $P > P_k$. O valor do deslizamento característico, s_k , corresponde a 90% do mínimo valor de $s_{k,i}$, medido num conjunto de provetes similares.

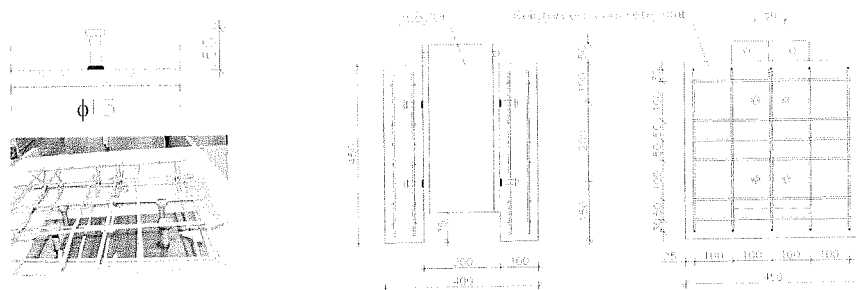


Fig. 3: Tipo e geometria dos provetes utilizados nos ensaios de tipo *push-out*

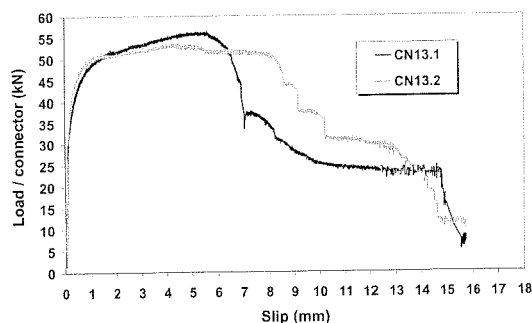
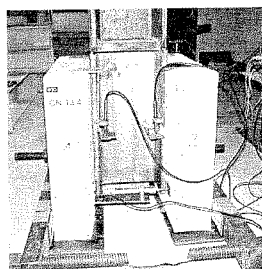


Fig. 4: Curvas força-deslizamento para ensaios de tipo *push-out* sob provetes com parafusos de 13 mm de diâmetro

Tabela 3: Resultados experimentais para ensaios de tipo *push-out*, obtidos em parafusos de 13 mm de diâmetro

Proвете	$P_{u,i}$ (kN)	$s_{Pu,i}$ (mm)	$P_{média}$ (kN)	P_k (kN)	$s_{elast,i}$ (mm)	s_{ki} (mm)	s_k (mm)	$s_{max,i}$ (mm)
CN 13.1	56.4	5.62	55.0	48.19	0.93	5.76	5.18	6.94
CN 13.2	53.5	4.46			0.67	7.78		8.51

4 Resultados experimentais para carregamentos cíclicos

A tabela 4 apresenta os valores efectivos do intervalo de carga aplicado durante a fase cíclica do carregamento e os resultados obtidos em termos de carga última (por conector) para cada provete ensaiado. Os ciclos de carga e descarga efectivamente aplicados pelo equipamento de ensaio diferem ligeiramente dos ciclos de carga previstos antes do início dos carregamentos.

Tal como definido na tabela 2, os provetes CN13.3, CN13.4 e CN13.5 resultam da mesma betonagem. A carga última para estes 3 provetes é muito similar, apesar do nº de ciclos e do

intervalo de carga aplicados variarem bastante. Os valores de carga última obtidos para estes provetes são ainda similares aos valores de carga última obtidos para os provetes ensaiados sob carregamento monotónico (CN13.1 e CN13.2). Este aspecto é importante porque significa que, para estes provetes, o nº de ciclos de carga aplicados e o seu intervalo não foram suficientes para reduzir a capacidade de carga da conexão. Pelo contrário, o provete CN13.6 foi afectado pelos ciclos de carga que lhe foram impostos, já que a rotura ocorreu durante esta fase do carregamento.

A tabela 5 resume os resultados obtidos nos ensaios realizados com carregamento cíclico, em termos de parâmetros como a carga máxima de ensaio ($P_{u,i}$) e o deslizamento correspondente ($s_{P_{u,i}}$), o valor médio da carga máxima para provetes provenientes da mesma betonagem ($P_{u,médio}$) e o deslizamento correspondente a 90% da carga máxima ($s_{0,9P_{u,i}}$).

Tabela 4: Ensaios cíclicos de tipo *push-out* - intervalo de carga e intervalo de tensão

Provete	Carregamento	ΔP (efectivamente aplicado)	ΔP (por conector)	$\Delta \tau$ (por conector)	$\Delta P/P_u$ (%)	$P_{u,i}$ (kN)	*
CN13.1	Monotónico	1.635 – 26.200	24.57	185.07	45.5	56.4	Sim
CN13.2	Monotónico	1.710 – 26.300	24.59	185.26	45.5	53.5	Sim
CN13.3	Cíclico	5.138 – 26.691	21.55	162.38	37.8	58.0	Sim
CN13.4	Cíclico	4.885 – 31.931	27.05	203.76	47.4	57.7	Sim
CN13.5	Cíclico	3.748 – 12.354	8.61	64.83	15.1	58.1	Sim
		3.357 – 24.639	21.28	160.34	37.3		
		3.549 – 30.603	27.05	203.82	47.5		
		3.232 – 36.466	33.23	250.38	58.3		
CN13.6	Cíclico	3.160 – 40.311	37.15	279.90	65.2	48.2	No
		4.786 – 16.057	11.27	84.92	20.9		
		4.533 – 31.872	27.34	205.97	50.6		
		4.571 – 39.889	35.32	266.08	65.4		
		4.477 – 48.158	43.68	329.10	80.9		

* - Carregamento monotónico até à rotura, após os ciclos de carga e descarga

Tabela 5: Força máxima e deslizamento correspondente

Provete	$P_{u,i}$ (kN)	$s_{P_{u,i}}$ (mm)	$P_{u,médio}$ (kN)	s_{max} (mm)	$s_{(0,9P_{u,i})}$ (mm)
CN 13.1	56.4	5.62	55.0	6.94	6.54
CN 13.2	53.5	4.46		8.51	8.44
CN 13.3	58.0	4.37	57.9	4.93	4.93
CN 13.4	57.7	1.26*		1.74*	1.74*
CN 13.5	58.1	3.99		5.73	5.62
CN 13.6	48.2	4.56		-	5.33

* - o ensaio de CN13.4 sofreu problemas iniciais que lhe impuseram alguma deformação permanente. Por este motivo, o provete não desenvolveu o mesmo nível de deformação final dos restantes provetes

Os valores do deslizamento correspondente à carga máxima são similares, mesmo para o provete CN13.6, o único cuja rotura ocorreu durante a fase de carregamento cíclico.

Os resultados obtidos permitem chegar a algumas conclusões importantes:

1. a carga máxima de ensaio só é afectada quando a relação $\Delta P/P_u$ é elevada;
2. o valor do deslizamento, correspondente à carga máxima não é afectado pela relação $\Delta P/P_u$ ou pelo nº de ciclos de carga e descarga aplicados, tanto quanto os resultados obtidos mostram. Tal significa que os valores de deslizamento máximo obtidos nos ensaios monotónicos permitem avaliar de forma razoável a capacidade de deformação da conexão;

- o valor de deslizamento medido imediatamente antes da rotura do primeiro perno, s_{max} , tende a ser superior nos provetes solicitados monotonicamente, apesar da diferença para os provetes solicitados ciclicamente ser pequena. Tal significa que a rotura dos provetes solicitados monotonicamente tende a ser mais dúctil do que a rotura dos provetes sob carregamento cíclico.

As conclusões anteriores mostram que pode ser importante desenvolver equações que quantifiquem a evolução do deslizamento em função do nº de ciclos de carga aplicados, de forma a prever o nº total de ciclos que pode ser aplicado para se obter a rotura do provete. Foi ainda observado que a relação $\Delta P/P_u$ pode influenciar o valor da carga última. É importante avaliar se este parâmetro também influencia a evolução do deslizamento.

Para todos os provetes testados, foram traçadas curvas de evolução do deslizamento, em função do nº de ciclos de carga aplicados, de que são exemplo os diagramas representados na Fig. 5, obtidos dos ensaios de CN13.3 e CN13.5.

A Fig. 5 mostra que a relação $\Delta P/P_u$ influencia a evolução do deslizamento. À medida que $\Delta P/P_u$ aumenta, o valor do deslizamento, medido sempre para o mesmo nº de ciclos de carga, tende a apresentar um crescimento mais acentuado. Desta forma, uma equação para prever o crescimento do deslizamento deve contemplar a influência de $\Delta P/P_u$.

De seguida, foram consideradas aproximações às curvas de deslizamento, de que são exemplo os diagramas representados na Fig. 6.

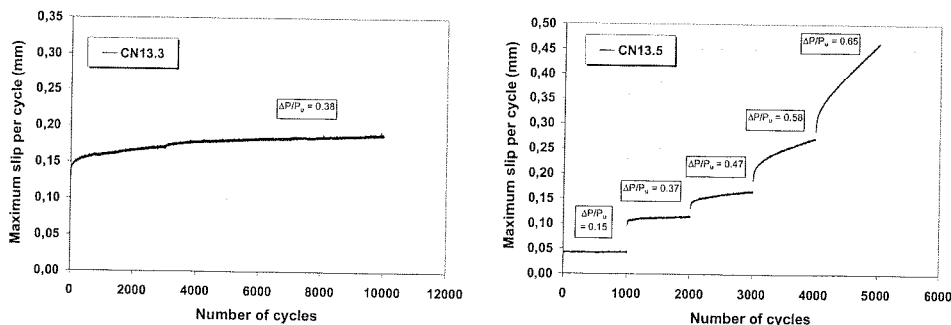


Fig. 5: Deslizamento máximo, medido em cada ciclo de carga para os provetes CN13.3 e CN13.5

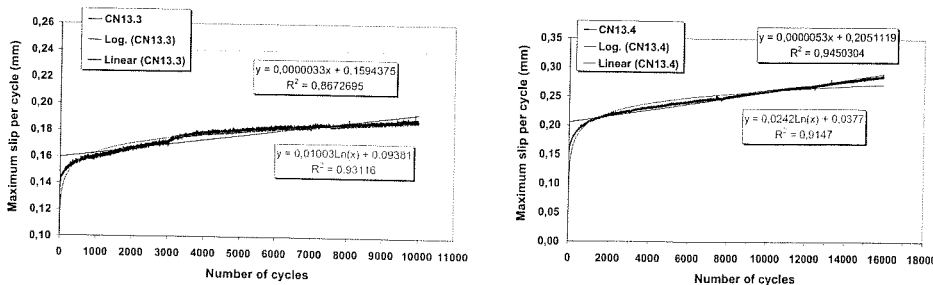


Fig. 6: Evolução do deslizamento durante os ciclos de carga para CN13.3 ($\Delta P = 21.55$ kN): $N_{ciclos} = 10000$ e para CN13.4 ($\Delta P = 27.05$ kN): $N_{ciclos} = 16000$

A análise destas curvas e a sua comparação mostra que:

- o crescimento do deslizamento é afectado pelo valor pela relação $\Delta P/P_u$ - o crescimento do deslizamento é superior, à medida que $\Delta P/P_u$ cresce;

2. o nº de ciclos de carga considerados afecta a avaliação que se faz da evolução do crescimento do deslizamento;
3. o crescimento do deslizamento é mais rápido durante os primeiros ciclos de carga;
4. durante os primeiros ciclos de carga aplicados, a evolução do deslizamento é bem aproximada por uma lei logarítmica;
5. o deslizamento tende a manter um crescimento linear, apenas após um elevado nº de ciclos de carga terem já sido aplicados;
6. uma lei logarítmica é a melhor aproximação à evolução do deslizamento, sempre que se considera um menor nº de ciclos de carga ou quando o intervalo de carga em cada ciclo é mais reduzido;
7. à medida que o intervalo de carga em cada ciclo, ΔP , aumenta, verifica-se que a evolução do deslizamento é mais bem aproximada por uma lei linear;
8. o crescimento do deslizamento, traduzido por uma lei linear, tende a ser mais reduzido à medida que se considera um maior nº de ciclos de carga;
9. o crescimento do deslizamento, traduzido por uma lei logarítmica, tende a ser mais elevado à medida que se considera um maior nº de ciclos de carga.

A tabela 6 apresenta os valores de crescimento do deslizamento para cada ciclo de carga, considerando aproximações lineares e aproximações logarítmicas e respectivos coeficientes de correlação. Quando se comparam, nos vários provetes, os ciclos de carga com relação $\Delta P/P_u$ similar, verifica-se que existe uma grande variabilidade nas taxas de crescimento do deslizamento. Esta variabilidade pode resultar do nº de ciclos de carga que é considerado em cada análise, o que significa que um maior nº de ensaios deverá ser realizado, de modo a resolver os problemas que decorrem da variabilidade de resultados.

Pelo que se pode concluir dos resultados obtidos, a lei logarítmica tende a constituir uma melhor aproximação aos resultados experimentais da evolução do deslizamento quando o intervalo de carga é menor: $\Delta P/P_u < 0.5$, enquanto que a lei linear tende a constituir uma melhor aproximação aos resultados experimentais da evolução do deslizamento quando o intervalo de carga é maior: $\Delta P/P_u > 0.5$.

Os valores de crescimento linear do deslizamento, obtidos durante os carregamentos cíclicos dos provetes CN13.3, CN13.4, CN13.5 e CN13.6 e apresentados na tabela 6, são

Tabela 6: Evolução do deslizamento por cada ciclo de carga – tendência linear e tendência logarítmica

Provete	P_{max} (kN)	Number of load cycles	ΔP (por conector) (kN)	$\Delta P/P_u$	Evolução do deslizamento (Linear) (mm/ciclo)	r^2 (Linear)	Evolução do deslizamento (Logarítmica) (mm/ln(ciclo))	r^2 (Logarítmica)
CN13.1	26.20	25	24.57	0.43	1054×10^{-6}	0.7219	0.00998	0.8317
CN13.2	26.30	25	24.59	0.43	700×10^{-6}	0.6370	0.00710	0.8409
CN13.3	26.69	10000	21.55	0.38	3.34×10^{-6}	0.8673	0.01003	0.9312
CN13.4	31.93	16000	27.05	0.48	5.33×10^{-6}	0.9450	0.02420	0.9147
CN13.5	12.35	1000	8.61	0.15	0.49×10^{-6}	0.0389	0.000076	0.0109
	24.64	1000	21.28	0.38	7.38×10^{-6}	0.7560	0.002295	0.8523
	30.60	1000	27.05	0.48	20.12×10^{-6}	0.9151	0.005924	0.9237
	36.47	1000	33.23	0.59	59.24×10^{-6}	0.9474	0.017091	0.9180
	40.31	1000	37.15	0.65	143.0×10^{-6}	0.9864	0.038955	0.8522
CN13.6	16.06	1000	11.27	0.20	5.92×10^{-6}	0.7287	0.001867	0.8441
	31.87	1000	27.34	0.48	69.27×10^{-6}	0.8764	0.021360	0.9703
	39.89	1000	35.32	0.62	469.23×10^{-6}	0.9849	0.128272	0.8569
	48.16	1000	43.68	0.77	28483×10^{-6}	0.9956	0.837822	0.8501

P_{max} – carga máxima em cada ciclo de carga, por conector

agora considerados, com vista a estabelecer uma relação entre a evolução do deslizamento por ciclo de carga e o parâmetro $\Delta P/P_u$. Essa relação é traduzida pela Eq. (1) e é comparada com os resultados obtidos por outros autores, tal como se apresenta na Fig. 7.

$$\log (s' / \text{ciclo}) = -7.11 + 5.79 \left(\frac{\Delta P}{P_u} \right) \quad (1)$$

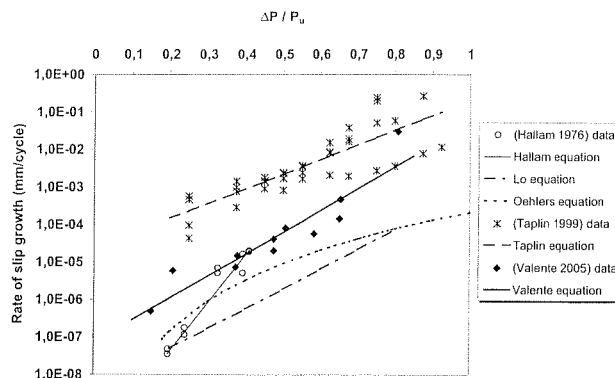


Fig. 7: Evolução do deslizamento, dependendo da relação $\Delta P/P_u$ ($N_{\text{ciclos}} = 1000$), para todos os provetes ensaiados sob carregamento cíclico

A equação obtida depende da relação $\Delta P/P_u$ de uma maneira similar à da equação obtida por [8], mas os valores obtidos para a evolução do deslizamento são sempre superiores aos obtidos por [8]. Com exceção dos resultados obtidos por [9], parece que a evolução do deslizamento para provetes com betão leve é superior à evolução do deslizamento para provetes com betão de massa volúmica normal.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou aspectos da fabricação, montagem, ensaio e análise de resultados para ensaios de tipo *push-out* realizados em provetes fabricados com betão leve de elevada resistência e pernos de cabeça, sob carregamentos monotónicos e cíclicos.

Os ensaios monotónicos permitiram obter resultados da capacidade resistente da conexão e da sua deformabilidade. As medições realizadas durante os carregamentos cíclicos permitiram avaliar o crescimento do deslizamento, por cada ciclo de carga aplicado. Verificou-se que o crescimento do deslizamento é influenciado pelo número de ciclos de carga aplicado. O crescimento do deslizamento em função do nº de ciclos de carga foi aproximado por leis de tipo linear e logarítmico, que foram aquelas que apresentaram os melhores coeficientes de correlação com os resultados medidos. Em termos globais, verificou-se que a lei logarítmica tende a constituir uma melhor aproximação aos resultados experimentais da evolução do deslizamento quando o intervalo de carga é menor: $\Delta P/P_u < 0.5$, enquanto que a lei linear tende a constituir uma melhor aproximação aos resultados experimentais da evolução do deslizamento quando o intervalo de carga é maior: $\Delta P/P_u > 0.5$.

Os diferentes níveis de carga impostos durante a fase cíclica de carregamento confirmou que o crescimento do deslizamento é muito dependente da relação $\Delta P/P_u$, pelo que as respectivas equações foram definidas, considerando este parâmetro. Em geral, a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por outros autores com

provetes de betão e massa volúmica normal, mostra que o crescimento do deslizamento tende a ser superior para o betão leve testado.

Referências

- [1] Oehlers DJ, Foley L. "Fatigue strength of stud shear connections in composite beams", *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 79(Part 2), 349-364, 1985.
- [2] Oehlers DJ. "Design and assessment of shear connectors in composite bridge beams". *Journal of Structural Engineering*, 121(2), 214-224, 1995.
- [3] Yen JYR, Lin Y, Lai MT. "Composite beams subjected to static and fatigue loads", *Journal of Structural Engineering*, 115(2), 765-771, 1997.
- [4] Bursi OS, Gramola G. "Behaviour of headed stud shear connectors under low-cycle high amplitude displacements", *Materials and Structures*, 32, 290-297, 1999.
- [5] Civjan SA, Singh P. "Behaviour of shear studs subjected to fully reversed cyclic loading", *Journal of Structural Engineering*, 129(11), 1466-1474, 2003.
- [6] Hanswille G, Porsch M, Ustundag C. "Resistance of headed studs subjected to fatigue loading: Part I : Experimental study and Part II: Analytical study", *Journal of Constructional Steel Research*, 63(4), 475-493, 2007.
- [7] European Committee for Standardization (CEN). EN 1994-1-1 – *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2005.
- [8] Lo KK. *Fatigue behaviour of stud connectors in composite plate and slab systems* (Tese mestrado), University of Melbourne, 1978.
- [9] Taplin G. *The behaviour of composite beams under repeated loading* (Tese Doutoramento), Monash University, 1999.