

# CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DA CONEXÃO AÇO-BETÃO EM ELEMENTOS MISTOS

Marco P. T. Fernandes<sup>a</sup>, Isabel B. Valente<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Aluno de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho,*

<sup>b</sup> *Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho*

**Resumo.** No presente trabalho, procura-se avaliar o comportamento de conectores de tipo perno inseridos em lajes maciças de betão leve de elevada resistência e sujeitos a carregamentos cíclicos. O estudo realizado é de carácter experimental e tem como objectivo geral avaliar e caracterizar o comportamento à fadiga da conexão entre aço e betão leve em elementos mistos. No desenvolvimento deste estudo fabricaram-se 2 provetes de tipo *push-out* (definido a partir da NP EN 1994-1 [1]) que foram ensaiados sob carregamento monotónico com controlo de deformação e 12 provetes de tipo *push-out*, que foram ensaiados sob ciclos de carga e descarga de várias amplitudes.

## 1 Introdução

A conexão entre uma secção de aço e uma secção de betão permite que estas funcionem como um elemento estrutural único. Para tal, os conectores metálicos devem de resistir ao esforço de corte longitudinal que se mobiliza entre as duas secções e também a esforços transversais ao plano da laje que tendem a causar a separação entre a laje e o perfil metálico.

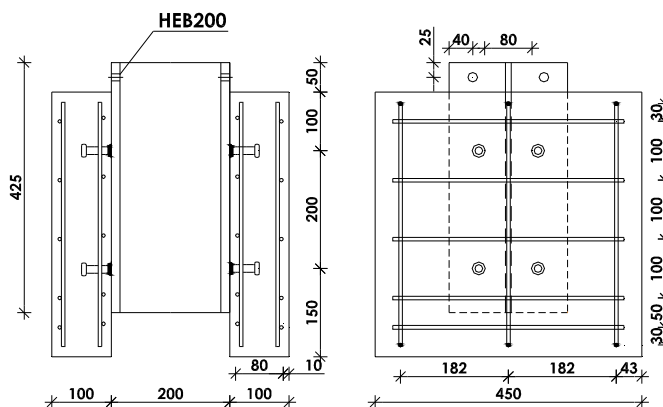
As pontes e as estruturas marítimas são particularmente sujeitas aos efeitos de carregamentos variáveis e repetitivos ao longo do tempo, fazendo com que o estudo da fadiga seja essencial para o seu bom dimensionamento. No caso das estruturas mistas, os deslocamentos e esforços induzidos pela variação da carga têm particular importância ao nível da conexão, que fica sujeita a esforços de corte de grandeza variável ao longo do tempo.

O objectivo geral do trabalho desenvolvido é o de caracterizar experimentalmente o comportamento à fadiga da conexão entre aço e betão leve em elementos mistos. Procura-se comparar o comportamento dos conectores sujeitos a carregamentos monotónicos e cíclicos, analisar o comportamento dos provetes no decorrer do carregamento e os modos de rotura verificados, definir uma curva *S-N* (intervalo de tensão - número de ciclos até a rotura) para o tipo de conexão em estudo, comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos por outros autores da bibliografia para betões de massa volúmica normal, comparar os resultados obtidos com os resultados que seriam de esperar mediante a utilização das expressões propostas na EN 1994-1-1 e em outros regulamentos de referência.

## 2 Provetes de tipo *push-out* – configuração, materiais utilizados e fabrico

Para estudar o comportamento da conexão aço-betão recorre-se ao ensaio de tipo “*push-out*”, pois este permite observar e avaliar o comportamento da conexão e dos mecanismos de rotura dos conectores.

O provete para o ensaio de tipo *push-out* consiste em duas lajes de betão armado colocadas na vertical e uma secção metálica entre estas. As lajes de betão que estão unidas ao perfil por 8 conectores de tipo perno. A carga é aplicada no topo superior do perfil metálico de forma a criar esforços de corte na interface entre a secção metálica e as lajes de betão. Fabricaram-se 12 provetes com as características apresentadas na Fig. 1.



**Fig. 1** – Geometria dos provetes utilizados nos ensaios de tipo *push-out*

No caso presente, os provetes são constituídos por duas lajes de betão leve colocadas na posição vertical, com  $450 \times 450 \times 100 \text{ mm}^3$ , e um perfil metálico do tipo HEB200 colocado entre elas. Os pernos de cabeça apresentam 13mm de diâmetro ( $d$ ) e 50mm de altura, são soldados ao perfil metálico e ficam betonados no interior das lajes de betão leve com armadura de 6 mm de diâmetro. O betão armado das lajes foi dimensionado para que a rotura não dependesse das dimensões do provete.

No fabrico das lajes, foi utilizado um betão leve de elevada resistência (BLER) composto por cimento CEM I 52.5 R, areia natural (granulometria 0 ao N<sup>o</sup>4), agregado leve (argila expandida, densidade  $830 \text{ kg/m}^3$ ), superplastificante do tipo Glenium 77 SCC e água.



**Fig. 2** – Esquema de realização da betonagem

Com o objectivo de analisar a massa volúmica deste betão leve, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, realizou-se um total de 24 cilindros. O valor da massa volúmica ( $\rho$ ) média corresponde a  $1821 \text{ kg/m}^3$ , o  $f_{cm}$  a 65 MPa e o  $E_{cm}$  a 21.1 GPa.

A armadura foi devidamente dimensionada, dobrada e montada de maneira a cumprir os recobrimentos estipulados (ver Fig. 1). As lajes foram betonadas na horizontal para reproduzir da melhor maneira as betonagens realizadas em obra. Para tal, utilizou-se o esquema representado na Fig. 2.

### 3 Montagem do ensaio

Os deslizamentos entre as lajes de betão e o perfil metálico foram medidos com quatro transdutores, dois em cada laje, posicionados ao lado do banzo do perfil (Fig. 3).

De maneira a impedir o movimento horizontal das lajes no sentido perpendicular ao banzo do perfil, colocaram-se barras estabilizadoras à volta do provete.

Dos 12 provetes testados sob carregamento cíclico, 6 foram testados na máquina Sentur II e os outros 6 foram ensaiados na máquina Microtest. Esta mudança deveu-se ao facto de a máquina Microtest ter sido entretanto adquirida pelo Laboratório de Estruturas de Eng<sup>a</sup> Civil da Universidade do Minho, tratando-se de um equipamento especialmente vocacionado para a realização de ensaios de fadiga. Deste modo, os provetes CN13.9 a CN13.12 foram ensaiados sob uma frequência de 0.125 Hz, os provetes CN13.7, CN13.8 e CN13.13 foram ensaiados sob uma frequência de 7 Hz, os provetes CN13.14, CN13.15 foram ensaiados sob uma frequência de 5 Hz e o provete CN13.16 foi ensaiado sob uma frequência de 4 Hz.

### 4 Cálculo do valor previsto para a capacidade de carga

Considerando as equações definidas na NP 1994-1-1 (1994) secção 6.6.3.1 (1), obtêm-se o valor mínimo de 53.1 kN para o valor de cálculo da resistência ao corte dos conectores.

Utilizou-se ainda o menor valor obtido nos ensaios monotónicos de *push-out* realizados por Valente [2], sobre provetes com configuração e materiais idênticos aos que foram definidos para o presente trabalho, já que este resultado foi obtido experimentalmente. Este valor é de  $P_u=53.5$  kN por perno. Uma vez que cada provete era constituído por 8 pernos, o valor previsto para a carga de rotura ( $P_u$ ) é de 428 kN.

### 5 Programa e procedimento de ensaio

Procurou-se variar o intervalo de carga, sendo esse intervalo definido a partir de uma percentagem do valor da carga última apresentada no ponto 4. O valor da carga máxima, nos diferentes intervalos de carga definidos, é constante e igual a  $\sim 60\% P_u$ , com excepção dos provetes CN13.11, CN13.11R e CN13.12, onde a carga máxima é  $\sim 80\% P_u$ .

Introduzem-se dois procedimentos principais no software que conduz a máquina de ensaio. No primeiro procedimento, aplica-se uma carga linear com controlo de força até se atingir metade da amplitude do ciclo de carga pretendido. No segundo procedimento, o sistema aplica ciclos de carga-descarga entre os valores extremos dos intervalos definidos na Tabela 1 através de um controlo da força. Este procedimento é traduzido por uma lei sinusoidal com uma frequência pré-definida.

### 6 Resultados da vida de fadiga

A Tabela 1 apresenta os valores efectivos do intervalo de carga aplicado durante a fase cíclica do carregamento e o número de ciclos de carga até a rotura para cada provete ensaiado. Todos os valores representados estão calculados por conector. A tensão de corte ( $\tau$ ) é calculada dividindo o valor do intervalo de carga pela área da secção transversal do conector.

O nível de carregamento ( $P$ ) aplicado é variável. A relação ( $P/P_u$ ) apresenta valores que podem variar entre um mínimo de 8.1 % e um máximo igual a 61.4%  $P_u$  na maioria dos provetes, com excepção dos provetes CN13.11, CN13.11R e CN13.12, onde se pretendeu impor um intervalo de carga maior, sendo para isso necessário aumentar o valor da carga máxima aplicada para ~80%.

Para cada um dos intervalos de carga ( $\Delta P$ ) definidos, ensaiaram-se 3 provetes iguais (com excepção do intervalo  $\Delta P/P_u = 41\%$ , onde se ensaiaram 2 provetes), de forma a obter resultados representativos. No estudo de fenómenos de fadiga, tende a verificar-se que os resultados apresentam elevada variabilidade, pelo que é fundamental obter resultados experimentais sobre vários provetes idênticos, submetidos às mesmas condições de ensaio. Nos ensaios realizados, essa variabilidade foi confirmada, através do número de ciclos apresentados na Tabela 1.

Ensaaiaram-se um total de 12 provetes. Desses, considera-se que os provetes CN13.9 e CN13.11 sofreram roturas precoces, devidos a problemas técnicos com a máquina de ensaio.

**Tabela 1** – Intervalos de carga e intervalos de tensão efectivamente aplicados

| Provete   | $\Delta P_{\text{previsto}}$<br>(%) | $\Delta P$<br>efectivamente<br>cumprido | $\Delta P$<br>(kN) | $\Delta \tau$<br>(MPa) | $\Delta P/P_u$<br>(%) | $P_{\text{min}}/P_u$<br>(%) | $P_{\text{max}}/P_u$<br>(%) | Nº de ciclos |         |
|-----------|-------------------------------------|---|--------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|---------|
| Microtest | CN13.7                              | 28-60% $P_u$                            | 14.51-32.11        | 17.61                  | 132.66                | 32.91                       | 27.12                       | 60.02        | 1063262 |
|           | CN13.8                              | 28-60% $P_u$                            | 14.77-32.50        | 17.73                  | 133.55                | 33.13                       | 27.61                       | 60.75        | 2042412 |
|           | CN13.13                             | 28-60% $P_u$                            | 14.70-32.50        | 17.80                  | 134.12                | 33.27                       | 27.48                       | 60.75        | 821695  |
|           | CN13.14                             | 19-60% $P_u$                            | 9.86-32.13         | 22.28                  | 167.84                | 41.64                       | 18.43                       | 60.06        | 471264  |
|           | CN13.15                             | 19-60% $P_u$                            | 9.92-32.21         | 22.29                  | 167.93                | 41.66                       | 18.54                       | 60.21        | 135036  |
|           | CN13.16                             | 10-60% $P_u$                            | 5.32-32.48         | 27.16                  | 204.62                | 50.76                       | 9.94                        | 60.71        | 15251   |
| Sentur II | CN13.9*                             | 10-60% $P_u$                            | 4.85-32.81         | 27.95                  | 210.61                | 52.25                       | 9.07                        | 61.33        | >14701  |
|           | CN13.9R                             | 10-60% $P_u$                            | 4.74-32.83         | 28.09                  | 211.59                | 52.50                       | 8.86                        | 61.36        | 4768    |
|           | CN13.10                             | 10-60% $P_u$                            | 4.70-32.83         | 28.12                  | 211.89                | 52.57                       | 8.79                        | 61.36        | 5758    |
|           | CN13.11*                            | 10-80% $P_u$                            | 4.57-43.36         | 38.79                  | 292.25                | 72.51                       | 8.54                        | 81.05        | >327    |
|           | CN13.11R                            | 10-80% $P_u$                            | 4.31-43.60         | 39.29                  | 295.99                | 73.43                       | 8.06                        | 81.50        | 2125    |
|           | CN13.12                             | 10-80% $P_u$                            | 4.46-43.45         | 39.00                  | 293.82                | 72.90                       | 8.34                        | 81.21        | 1754    |

\* - devido a problemas com a máquina de ensaio, os provetes CN13.9 e CN13.11 sofreram roturas precoces

Da análise dos resultados, torna-se evidente que o aumento do intervalo de tensão aplicada faz com que o número de ciclos necessários para se atingir a rotura do provete diminua. Isto deve-se ao facto de as elevadas amplitudes de carga provocarem maiores deformações nos pernos, levando a uma menor resistência do provete.

Alguns dos provetes idênticos testados, CN13.9R, CN13.10 e CN13.16, foram ensaiados em máquina diferentes. O valor da frequência de carregamento aumentou consideravelmente com a máquina da Microtest (4 Hz). Apesar disso, os provetes apresentaram comportamentos similares e resistiram também a números de ciclos próximos. Uma vez que em fadiga, a disparidade de ciclos normalmente é grande, e como o provete CN13.16 tem ligeiramente menos carga, a discrepância observada é bastante lógica.

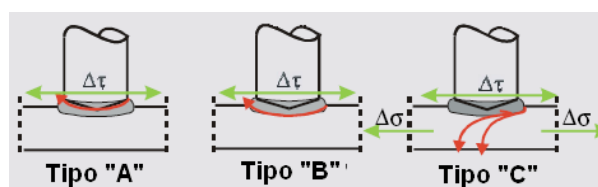
Verifica-se que o aumento de intervalo de tensão entre grupos de provetes é proporcional, o mesmo não sucedendo com o número de ciclos. Para intervalos de tensão maiores do que 170 MPa (para um valor de  $\Delta P/P_u$  superior ao 45%), existe uma grande diminuição do número de ciclos. A partir dos 170 MPa começa-se a considerar um intervalo alto de carregamento. Aqui, verificou-se uma maior variabilidade dos resultados, em termos do número de ciclos até à rotura, para os mesmos intervalos altos de carregamento. Esta variabilidade acontece apesar de estes ensaios serem realizados assegurando o mesmo cuidado e pormenor laboratorial em todos os provetes.

## 7 Comportamento dos provetes - fendilhação e rotura

A rotura por fadiga pode acontecer de três formas diferentes, tal como se apresenta na Fig. 4: de tipo “A”, onde a rotura acontece inicialmente na haste do perno e se prolonga até ao cordão de soldadura; de Tipo “B”, onde a fenda se inicia na base do cordão de soldadura, e progride na zona de transição entre o cordão de soldadura e o banzo do perfil metálico; de tipo “C”, onde a rotura se inicia e se desenvolve na base do cordão de soldadura, mas depois se prolonga pelo banzo do perfil metálico. Desta forma, uma especial atenção deve ser dada ao comportamento à fadiga do cordão de soldadura dos pernos.



**Fig. 3** – Montagem final do provete e pormenores de colocação dos transdutores



**Fig. 4** – Formas de rotura (adaptado de Odenbreit et al [3])

Em geral, a rotura dos pernos utilizados neste trabalho aconteceu logo acima do colar de soldadura. As formas de rotura do perno não são sempre iguais, mas independentemente da posição do perno ou da laje, verificaram-se roturas maioritariamente de tipo “A” e algumas de tipo “B” (ver Fig. 4). Em algumas situações, verificou-se uma combinação destas duas formas de rotura. A grande profundidade deixada pelo perno no banzo do perfil, quando é arrancado, e o aspecto do perfil, levam a concluir que, pontualmente, a rotura é também uma combinação entre o tipo “B” e “C”. Em todos os provetes existe sempre betão esmagado por baixo do perno, particularmente localizado à volta do colar de soldadura. Tal seria de esperar, pois é uma zona onde se verificam elevadas tensões de compressão.

No decorrer do ensaio, o comportamento do provete foi analisado com detalhe. Esta análise permitiu concluir que:

- Na fase linear do programa de carregamento, quando os provetes atingem o valor máximo de carga, a formação de fendas na laje de betão se inicia sempre na perpendicular ao perfil e ao redor do perno, prolongando-se até ao final do ensaio;

- As fendas iniciais se devem a uma fase de “ajuste” do provete ao carregamento, pois em alguns ensaios, e independentemente do intervalo de carregamento, não se verificaram essas mesmas fendas iniciais. Em alguns dos provetes nem se verificaram fendas visíveis. É de salientar que nestes ensaios os provetes resistiram a um número maior de ciclos. Estes provetes partiram pela pura fadiga ao corte do perno devido à variação da carga;

- Uma vez que o provete é betonado em 2 fases, os betões que constituem cada uma das lajes não são exactamente iguais, embora tenham características muito próximas. Neste sentido, verificou-se que a rotura nem sempre acontece no lado em que a laje é constituída por um betão com menor resistência e nem sempre acontece do lado da laje onde se verifica maior número de fendas ou fendas de maiores dimensões. A forma de rotura dos provetes não é sempre igual, contudo, a rotura verificou-se sempre com corte do perno.

- Em geral, quanto maior o intervalo de carga, maior é o grau de “destruição” final da laje. Verifica-se que o betão tem maior influência, ou seja, “trabalha” mais para a resistência em intervalos de tensão elevados.

## 8 Vida de fadiga calculada a partir de diferentes regulamentos

A EN 1994-1-1 [1] definiu a sua curva S-N com base em ensaios de push-out, com pernos de 19 e 22 mm embebidos em lajes de betão de massa volúmica normal de resistência de entre 20 e 30 MPa. Este regulamento define a curva de fadiga, utilizando a equação (1),

$$\log(N_R) + 8 \times \log(\Delta\tau_R) = 21,94 \quad (1)$$

Para conectores embebidos em lajes de betão leve, com uma densidade definida de acordo com a secção 11 da EN 1992-1-1 [4], a vida de fadiga ( $N_{RL}$ ) deve ser determinada utilizando a equação (2). Para o betão leve utilizado neste projecto, utilizou-se a média das densidades de todas as betonagens, obtendo-se o valor de  $\eta_E$  igual a 0.69.

$$(\Delta\tau_R \times \eta_E)^8 N_{RL} = (90 \times \eta_E)^8 \times 2 \times 10^6 \quad \wedge \quad \eta_E = \left( \frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (2)$$

O regulamento inglês BS 5400 [5] utilizou pernos de cabeça de 19 mm inserido em lajes de betão com resistências entre 20 e 50 MPa. Para avaliar a resistência à fadiga, emprega a equação (3), onde  $m = 8$  e  $k = 4.16$ . A resistência ao corte do perno ( $P_{Rd}$ ) depende também do módulo de elasticidade do aço  $E_s$  e da tensão última do aço,  $f_u$ , e é dada pela equação (4),

$$\log(N_R) + m \log(\Delta P / P_{Rd}) = 1,29 \quad (3)$$

$$P_{Rd} = \frac{k \times \pi \times d^2}{4} \times f_c^{0,34} \times \left( \frac{E_{cm}}{E_s} \right)^{0,4} \times f_u^{0,65} \quad (4)$$

De acordo com a norma AASHTO [6] o valor do esforço de fadiga de conectores tipo perno é definido pela equação (5).

$$\Delta\tau_R = 303 - 37.6 \log(N_R) \quad (5)$$

## 9 Vida de fadiga calculada a partir de diversos autores da bibliografia

O “Peak Load model” baseia-se no trabalho de Oehlers [7], onde se definiu a equação (6), a través do valor de pico do intervalo de carregamento ( $P_p$ );

$$\log(N_K) + 5.1 \times \log(\Delta P / P_R) - \text{Log}[1 - (P_p / P_R)] = 3 \quad (6)$$

Lee et al. [8] analisaram o comportamento de conectores de 25, 27 e 30 mm de diâmetro. O betão utilizado tinha uma resistência à compressão de 30 e 40 MPa. A partir de uma análise de regressão linear dos resultados ensaiados, foi obtida a equação (7).

$$\log(N_R) + 11.8 \times \log(\Delta\tau_R) = 30.235 \quad (7)$$

Faust et al. [9] utilizaram um betão leve da classe BL 45/50. Os seus provetes continham 4 pernos de 22 mm de diâmetro. O estudo realizado finalizou com a equação (8).

$$\log(N_R) + 6.67 \times \log(\Delta\tau_R) = 19.41 \quad (8)$$

No trabalho realizado por Hanswille et al [10], os provetes continham 4 pernos de 22 mm de diâmetro e eram realizados com um betão de resistência à compressão entre os 45 e 55 MPa. Devido à dispersão dos resultados, não foi determinada uma curva de aproximação. Verificam-se diferenças de mais de 3 milhões de ciclos em relação a outros trabalhos (Fig. 8).

## 10 Análise dos resultados para o cálculo da vida de fadiga

Estabelece-se a curva de fadiga relativa aos resultados experimentais obtidos, representando em escala logarítmica o número de ciclos em função do intervalo de tensão. Realizando uma regressão linear sobre a curvas de resultados, obtém-se o diagrama da Fig. 5.

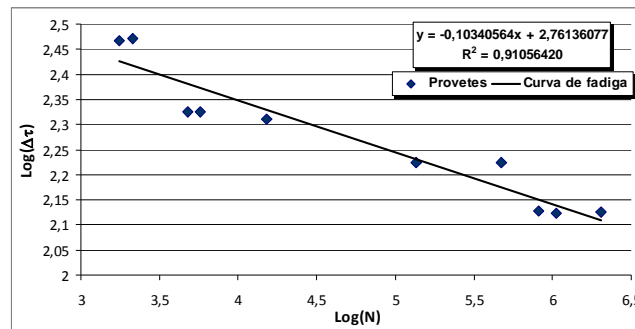


Fig. 5 – Gráfico para obter a equação da recta que define a vida de fadiga

A curva de fadiga relativa aos resultados experimentais é traduzida pela equações (9) e (10) que foram estabelecidas tendo em conta os pressupostos da equação (1).

$$(\Delta\tau_R)^{9,67} N_R = (128.77)^{9,67} 2 \times 10 \quad (9)$$

$$\log(N) + 9.67 \times \log(\Delta\tau) = 26.71 \quad (10)$$

## 11 Resultados obtidos vs. regulamentos

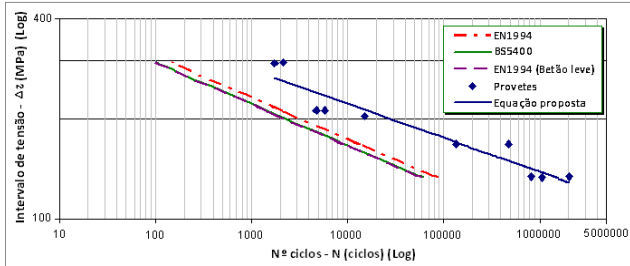
Na Tabela 2 são apresentados os resultados experimentais obtidos neste trabalho, traduzidos no número de ciclos a que cada provete foi submetido até atingir a rotura e apresenta-se ainda o número de ciclos que seriam de esperar, utilizando as equações propostas nos diversos regulamentos (equações (1) a (5)). Estes valores estão representados na Fig. 6, em dupla escala logarítmica. Da mesma forma realizou-se a Fig. 7, mas o intervalo de tensão não se encontra na escala logarítmica, de forma a poder ser comparado com o regulamento AASHTO (ver equação (5)). Com estes dados, foi possível estabelecer uma comparação e identificar a tendência dos resultados obtidos neste estudo.

Os valores obtidos pelos diferentes regulamentos indicam que a rotura por fadiga ocorre muito antes do que foi verificado nos ensaios realizados no presente estudo. Em qualquer dos casos, as curvas de fadiga regulamentares são definidas com uma margem de segurança.

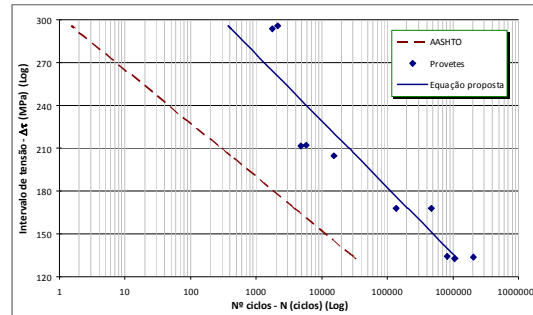
Existem diferenças significativas entre os resultados experimentais e os resultados obtidos a partir das equações regulamentares. Neste sentido, salienta-se a norma AASHTO, onde a vida de fadiga prevista se afasta dos resultados obtidos para intervalos de tensão elevados.

**Tabela 2** – Resultados do esforço de fadiga dos provetes experimentais, comparando-os com os resultados obtidos pelas equações de diferentes regulamentos

| Provetes | $\Delta P$<br>(MPa) | $\Delta\tau$<br>(MPa) | $N_R$<br>Exp.<br>(ciclos) | $N_R$<br>(Eq. (10))<br>(ciclos) | $N_R$<br>EN1994<br>(ciclos) | $N_{R,L}$<br>EN1994<br>(ciclos) | $N_R$<br>AASHTO<br>(ciclos) | $P_R$<br>BS5400<br>(kN) | $N_R$<br>BS5400<br>(ciclos) |
|----------|---------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| CN13.7   | 17.61               | 132.66                | 1063262                   | 1495784                         | 89732                       | 61585                           | 33901                       | 48.29                   | 62412                       |
| CN13.8   | 17.73               | 133.55                | 2042412                   | 1402107                         | 85056                       | 58376                           | 32102                       | 48.29                   | 59160                       |
| CN13.13  | 17.80               | 134.12                | 821695                    | 1345942                         | 82227                       | 56434                           | 31009                       | 48.29                   | 57192                       |
| CN13.14  | 22.28               | 167.84                | 471264                    | 153908                          | 13668                       | 9381                            | 3932                        | 48.29                   | 9507                        |
| CN13.15  | 22.29               | 167.93                | 135036                    | 153157                          | 13613                       | 9343                            | 3911                        | 48.29                   | 9469                        |
| CN13.16  | 27.16               | 204.62                | 15251                     | 22672                           | 2802                        | 1923                            | 414                         | 48.29                   | 1949                        |
| CN13.9R  | 28.09               | 211.59                | 4768                      | 16396                           | 2143                        | 1471                            | 270                         | 48.29                   | 1490                        |
| CN13.10  | 28.12               | 211.89                | 5758                      | 16175                           | 2119                        | 1454                            | 265                         | 48.29                   | 1474                        |
| CN13.11R | 39.29               | 295.99                | 2125                      | 639                             | 146                         | 100                             | 2                           | 48.29                   | 102                         |
| CN13.12  | 39.00               | 293.82                | 1754                      | 686                             | 155                         | 106                             | 2                           | 48.29                   | 108                         |



**Fig. 6** - Gráfico que relaciona o  $\Delta\tau-N_R$ , para este trabalho e para os regulamentos de referência.



**Fig. 7** - Gráfico que relaciona o  $\Delta\tau-N_R$ , para este trabalho e para o regulamento AASTHO

Verifica-se ainda uma grande similitude, ou quase coincidência, entre as rectas do regulamento BS 5400 [5] e o EN 1994-1-1 [1] para betão leve. A equação que mais se ajusta aos valores obtidos experimentalmente é a proposta pela EN 1994-1-1 [1].

As várias rectas apresentam aproximadamente a mesma inclinação, ou seja,  $m$  relativamente equiparáveis, com uma maior inclinação para a recta que define os provetes ensaiados neste trabalho (equação (10)). Isto indica que a conexão com pernos de 13 mm inseridos em betão leve, sofre maior dano por fadiga para maiores intervalos de tensão e menor dano para baixos intervalos de tensão. À medida que aumenta o intervalo de tensão diminuem as diferenças entre os vários regulamentos, excepto para a norma AASTHO que conduz a resultados bastante diferentes dos restantes. Os valores obtidos no presente estudo são coerentes com os valores obtidos aplicando as equações propostas nos regulamentos abordados, o que em conjunto com o elevado valor do coeficiente de correlação obtido (ver Fig. 5), demonstra que os valores obtidos nos ensaios laboratoriais são de grande interesse.

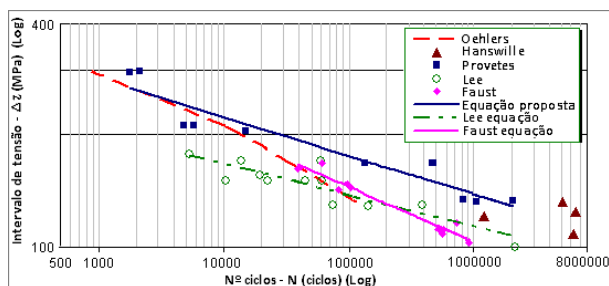
## 12 Resultados obtidos vs. resultados de outros autores

Na Tabela 3 apresentam-se os diferentes resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados por vários autores, em termos de vida de fadiga e correspondente intervalo de tensão. Estes valores também estão representados na Fig. 8 em dupla escala logarítmica e acompanhados da equação da recta que melhor os ajusta.

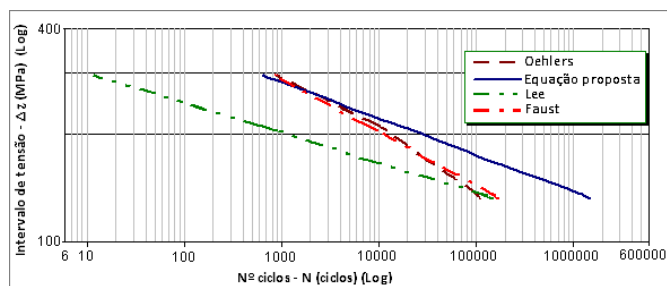
**Tabela 3** – Comparação entre a vida de fadiga dos provetes ensaiados e os resultados obtidos por diferentes autores

| Experi-<br>mental     |                   | Equação<br>proposta | Oehlers et al. [7]    |                   | Lee et al. [8]        |                   | Faust et al. [9]      |                   | Hanswille et al.<br>[10] |                   |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| $\Delta\tau$<br>(MPa) | $N_R$<br>(ciclos) | $N_R$<br>(ciclos)   | $\Delta\tau$<br>(MPa) | $N_R$<br>(ciclos) | $\Delta\tau$<br>(MPa) | $N_R$<br>(ciclos) | $\Delta\tau$<br>(MPa) | $N_R$<br>(ciclos) | $\Delta\tau$<br>(MPa)    | $N_R$<br>(ciclos) |
| 132.66                | 1063262           | 1498846             | 132.66                | 115676            | 100.00                | 2133970           | 110.90                | 566000            | 107.86                   | 6200000           |
| 133.55                | 2042412           | 1404950             | 133.55                | 109862            | 150.00                | 44825             | 110.90                | 522600            | 121.01                   | 1200000           |
| 134.12                | 821695            | 1348656             | 134.12                | 107416            | 170.00                | 60000             | 116.00                | 720000            | 132.19                   | 5100000           |
| 167.84                | 471264            | 154121              | 167.84                | 34822             | 130.00                | 387209            | 141.80                | 83700             | 95.23                    | 3500000           |
| 167.93                | 135036            | 153369              | 167.93                | 34602             | 150.00                | 61063             | 144.40                | 103600            | 124.30                   | 6400000           |
| 204.62                | 15251             | 22691               | 204.62                | 12471             | 177.30                | 5320              | 147.00                | 96500             |                          |                   |
| 211.59                | 4768              | 16408               | 211.59                | 10336             | 128.40                | 142641            | 167.60                | 60400             |                          |                   |
| 211.89                | 5758              | 16187               | 211.89                | 10263             | 150.00                | 22488             | 108.30                | 550000            |                          |                   |
| 295.99                | 2125              | 639                 | 295.99                | 894               | 170.00                | 13766             | 103.20                | 907000            |                          |                   |
| 293.82                | 1754              | 686                 | 293.82                | 942               | 130.00                | 75484             | 103.20                | 913000            |                          |                   |
|                       |                   |                     |                       |                   | 150.00                | 10436             | 162.50                | 39140             |                          |                   |
|                       |                   |                     |                       |                   | 156.10                | 19333             |                       |                   |                          |                   |





**Fig. 8** – Relação entre intervalo de tensão e vida de fadiga, para diferentes autores



**Fig. 9** – Relação entre  $\Delta\tau$ - $N_R$ , para este trabalho e para as expressões obtidas por outros autores

Devido à impossibilidade de obter os valores laboratoriais obtidos por Oehlers [7], só está presente no gráfico a expressão final do “*Peak load model*”, para os diferentes intervalos de carregamento. Com exceção da curva obtida por Lee [8], todos os outros autores obtiveram rectas com inclinações inferiores à da recta proposta neste trabalho (ver Fig. 8).

Utilizando as expressões obtidas pelos diferentes autores, calculou-se o número de ciclos até à rotura, que se apresenta na Tabela 4. Utilizaram-se os mesmos intervalos de tensão que tinham sido definidos para os ensaios experimentais realizados neste trabalho. Estes valores estão também representados na Fig. 9, em dupla escala logarítmica.

As propostas dos vários autores analisados apresentam baixa inclinação, o que faz com que o dano seja menor para valores de carregamentos altos, em relação a uma recta com valor “*m*” maior. Como se pode verificar, à medida que aumenta o intervalo de tensão, os resultados obtidos por Oehlers [7] e por Faust [9] aproximam-se dos resultados experimentais obtidos no presente trabalho. No caso da curva proposta por Lee [8] as diferenças aumentam assim que o intervalo de tensão aumenta.

Pode-se constatar uma grande semelhança entre as curvas de fadiga propostas por Faust [9] e por Oehlers [7]. É interessante verificar a semelhança entre estas curvas porque as expressões que as definem envolvem parâmetros diferentes. A expressão de Faust [9], para obter o número de ciclos é influenciada pelo intervalo de carga e pelo diâmetro do perno. A expressão de Oehlers [7] é influenciada pelo intervalo de carga e pelo respectivo valor de carga de pico no intervalo ( $P_p$ ).

**Tabela 4** – Valores do número de ciclos para os diferentes autores e a comparação com os resultados do presente trabalho

| $\Delta\tau$ (MPa) | Equações - N° de ciclos    |                     |                 |                   | $N_R / N$   |         |           |
|--------------------|----------------------------|---------------------|-----------------|-------------------|-------------|---------|-----------|
|                    | Equação proposta ( $N_R$ ) | Oehlers [7] ( $N$ ) | Lee [8] ( $N$ ) | Faust [9] ( $N$ ) | Oehlers [7] | Lee [8] | Faust [9] |
| 132.66             | 1498846                    | 115676              | 153645          | 177926            | 12.96       | 9.76    | 8.42      |
| 133.55             | 1404950                    | 109862              | 141983          | 170162            | 12.79       | 9.90    | 8.26      |
| 134.12             | 1348656                    | 107416              | 135072          | 165429            | 12.56       | 9.98    | 8.15      |
| 167.84             | 154121                     | 34822               | 9574            | 37057             | 4.43        | 16.10   | 4.16      |
| 167.93             | 153369                     | 34602               | 9517            | 36932             | 4.43        | 16.11   | 4.15      |
| 204.62             | 22691                      | 12471               | 924             | 9886              | 1.82        | 24.54   | 2.30      |
| 211.59             | 16408                      | 10336               | 622             | 7905              | 1.59        | 26.36   | 2.08      |
| 211.89             | 16187                      | 10263               | 612             | 7832              | 1.58        | 26.44   | 2.07      |
| 295.99             | 639                        | 894                 | 12              | 843               | 0.71        | 53.87   | 0.76      |
| 293.82             | 686                        | 942                 | 13              | 885               | 0.73        | 53.04   | 0.78      |
|                    |                            |                     |                 | Média             | 5.36        | 24.61   | 4.11      |

Existe uma disparidade entre a curva proposta por Lee [8] e as restantes, ao nível da inclinação e ao nível de número de ciclos obtidos. Quando os valores do intervalo de tensão são mais elevados, existem variações significativas no número de ciclos obtidos, o que se

pode constatar na Fig. 9, onde a curva de Lee [8] se afasta bastante dos outros resultados, no caso de valores de intervalos de carga superiores a 200 MPa.

Os valores obtidos pelos diferentes estudos parecem indicar que a rotura por fadiga ocorre muito antes dos valores de vida de fadiga alcançados neste estudo. Neste sentido, constata-se a boa capacidade de resistência à fadiga da conexão com pernos de 13mm de diâmetro, inseridos em lajes de betão leve de elevada resistência.

### 13 Conclusões

Os ensaios são demorados, devido às cargas elevadas a que o provete consegue resistir e ao seu bom comportamento à fadiga. Em cada provete ensaiado foi necessário aplicar um elevado número de ciclos de carga e descarga, prolongando o tempo de ensaio por muitos dias. Pode-se concluir que as lajes de betão leve foram bem dimensionadas, tendo em conta o seu comportamento experimental.

Verificou-se alguma variabilidade no números de ciclos até à rotura quando os provetes ensaiados e os níveis de carregamento eram semelhantes. Esta variabilidade era esperada, sendo comum em ensaios de fadiga.

A vida de fadiga é superior para os ensaios realizados neste estudo quando comparada com os diferentes regulamento e autores estudados. Verifica-se nas Fig. 6, Fig. 7, e Fig. 9 que a recta que define os ensaios realizados neste trabalho se encontra à direita de todas as restantes, isto é, para o mesmo valor de intervalo de tensão de corte aplicado na viga mista, esta resiste a um maior número de ciclos até à sua rotura. Comparando este estudo com os restantes estudos, pode-se concluir, que os pernos de diâmetro inferior embebidos em betão leve, obtêm valores de inclinação da recta superiores. Verifica-se que os pernos de 13 mm inseridos em betão leve têm maior resistência para valores de intervalos de tensão baixos.

### Referências

- [1] Eurocódigo 4, ENV 1994: Design of composite steel and concrete structures. European Committee for standardization (CEN), 2004.
- [2] Valente, I., “Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges”. Tese de doutoramento. Univ. do Minho, Portugal, Julho 2007.
- [3] Odenbreit, C.; Leffer, A.; Feldmann, M.: Fatigue Behaviour of shear studs to transfer Dynamic loads between steel and concrete construction elements.
- [4] Eurocódigo 2, EN 1992-1-1: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for standardization (CEN), 1994.
- [5] BS 5400 1980. Steel, concrete and composite bridges. Parte 10: Fatigue. British Standards Institution, 1980.
- [6] AASHTO LRFD. Bridge design specifications. 3<sup>rd</sup> edição. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [7] Johnson, R. P.: Resistance of stud shear connections to fatigue. Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Fevereiro 2000, Vol.56, No. 2, pp. 101-116.
- [8] Lee P.-G., Shim C.-S., Chang S.-P.: Static and fatigue behaviour of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridges. Journal of Const. Steel Research 61 (2005) 1270-1285.
- [9] Faust, T.; Leffer, A.; Mensinger, M.: LWAC in Composite Structures, Second Int. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norway, Junho 2000, pp. 212-374.
- [10] Hanswille, G.; Porsch, M.; Ustundag, C.: Resistance of headed studs subjected to fatigue loading. Journal of Const. Steel Research, Abril 2007, Vol. 63, N.4, Parte I: Experimental study, pp. 475-484 e Parte II: Analytical study, pp. 485-493.