



## ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O REFORÇO DE PILARES DE BETÃO ARMADO COM CANTONEIRAS E PRESILHAS METÁLICAS. ANÁLISE PARAMÉTRICA.

Mariana C. Andrade<sup>a</sup>, Julio G. Roca<sup>b</sup> e Isabel B. Valente<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

<sup>b</sup> *ICITECH, Universidad Politécnica de Valencia*

**Resumo.** A presente comunicação descreve o estudo paramétrico desenvolvido com base no método dos elementos finitos (MEF) para analisar a influência de factores geométricos e mecânicos no comportamento à flexo-compressão de pilares de betão armado (BA) reforçados com cantoneiras e presilhas de aço (*steel caging*). Com base num modelo de elementos finitos 3D, levou-se a cabo um estudo numérico sobre a influência de vários factores no comportamento à flexo-compressão de pilares BA. Esses factores são: a dimensão dos pilares, a dimensão dos elementos que formam o reforço (cantoneiras e presilhas) e as propriedades mecânicas dos materiais constituintes do pilar de betão armado e do reforço (cantoneiras e presilhas de aço).

### 1. Introdução

Os reforços com *steel caging*, que consistem em colocar uma cantoneira metálica em cada um dos quatro cantos do pilar e uni-las entre si através de uma série de presilhas soldadas, apresentam uma certa complexidade no seu comportamento estrutural, especialmente quando existem esforços de flexo-compressão no pilar, de tal forma que atualmente não existe uma metodologia analítica que permita efetuar o seu dimensionamento de forma satisfatória.

No presente trabalho, desenvolveu-se um estudo numérico sobre a influência no comportamento à flexo-compressão de vários factores como a dimensão dos pilares, a dimensão dos elementos que formam o reforço (cantoneiras e presilhas) e as propriedades mecânicas dos materiais constituintes do pilar de betão armado e do reforço (cantoneiras e presilhas de aço). Utilizou-se um modelo de elementos finitos 3D, onde se considera o betão armado e os componentes de aço do reforço como elementos sólidos, e as armaduras como elementos lineares. O modelo teve em conta a não linearidade geométrica, as não linearidades mecânicas dos materiais utilizados, e a fricção entre o betão do pilar e o aço do reforço.

A partir dos resultados obtidos no modelo de elementos finitos realizado foi possível explicar o funcionamento global deste sistema de reforço e avaliar a importância dos parâmetros analisados.

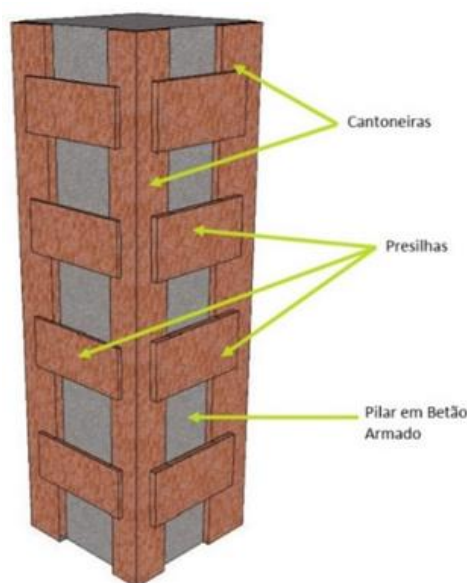
## 2. Técnicas de reforço de pilares BA

São várias as técnicas de reforço reconhecidas e adotadas no reforço de pilares BA. O encamisamento com betão e com aço e o reforço com sistemas compósitos (FRP – Polímeros Reforçados com Fibras) constituem algumas dessas técnicas [1].

Os encamisamentos com betão e com aço são técnicas de fácil aplicação, sendo que a primeira apresenta como grande vantagem económica o facto de não ser necessário contratar mão-de-obra especializada. Contudo, quando esta técnica é empregue, a secção transversal aumenta, assim como o tempo de espera para que o betão ganhe a resistência necessária [2]. O mesmo não se verifica no encamisamento com aço. A técnica executa-se mais rapidamente e acompanha a estética original. No entanto, para além de trabalhadores especializados, é também necessária uma fiscalização mais rigorosa. A aplicação de encamisamento com sistemas compósitos de FRP corresponde à técnica com melhores condições de resistência. Do ponto de vista da durabilidade, da resistência à corrosão e da resistência à fadiga, esta técnica é a que apresenta maiores vantagens. Porém, o reforço por sistemas compósitos (FRP) apresenta um inconveniente decisivo face à conjuntura económica atual que é o elevado custo de aplicação [3].

O *steel caging* é uma variante do encamisamento com aço bastante utilizada na Europa [4]. Caracteriza-se pela aplicação, em pilares de betão armado com secção transversal retangular ou quadrangular, de cantoneiras de aço às quais são soldadas presilhas do mesmo material, tal como é representado na Fig. 1. A técnica é corretamente aplicada, quando o espaço entre os elementos metálicos e o pilar de betão armado é preenchido com argamassa ou resina *epoxy* [5].

A investigação sobre esta técnica não tem sido abundante. No entanto, a sua aplicação em estruturas reais tem sido frequente devido à sua eficácia no aumento da resistência e da ductilidade [1], e na maior economia e facilidade de aplicação [6].



**Fig. 1:** Pilar de betão armado reforçado com cantoneiras e presilhas de aço

### 3. Resumo dos trabalhos experimentais e numéricos anteriormente desenvolvidos

Com base no estudo do comportamento de pilares de betão armado reforçados com *steel caging* quando sujeitos ao carregamento de cargas combinadas de flexo-compressão, foram ensaiados e simulados numericamente provetes representativos de um pilar em betão armado, ao qual se liga uma viga do mesmo material, permitindo estudar a influência e o comportamento da ligação viga-pilar [5,7,8].

Os ensaios realizados permitiram observar que existem três mecanismos que proporcionam um aumento na capacidade resistente num pilar reforçado com *steel caging*: a transmissão direta de esforços entre a ligação viga-pilar e o aço colocado no reforço, o confinamento do betão do pilar, e a transmissão de esforços rasantes entre o betão e o aço do reforço.

Para além dos ensaios experimentais, os provetes foram modelados e validados com o Método dos Elementos Finitos, assegurando todas as características relevantes, como os parâmetros relativos ao comportamento mecânico dos materiais utilizados, o modo de rotura, o máximo valor de carga aplicada e a evolução das cargas transmitidas ao pilar pelo reforço.

Os modelos foram desenvolvidos e simplificados através da consideração dos planos de simetria representados na Fig. 2. Obtiveram-se diagramas de flexo-compressão, que permitiram perceber os mecanismos resistentes do reforço e estudar formas de melhorar o seu comportamento. Para além do referido, foi também efetuado um estudo paramétrico para analisar a influência dos diferentes parâmetros relevantes no funcionamento dos pilares de betão armado reforçados com *steel caging*, quando submetidos a flexo-compressão [7].

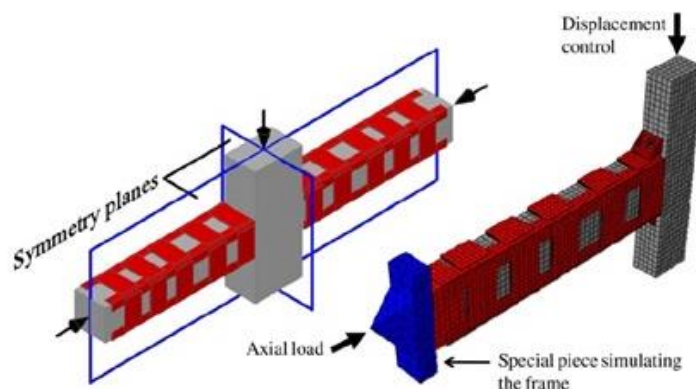


Fig. 2: Modelo numérico desenvolvido, consideração de planos de simetria [7]

### 4. Modelo de elementos finitos

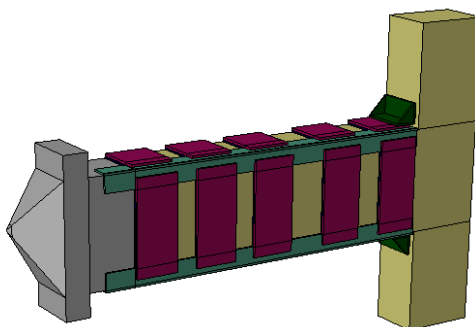
Como continuação do trabalho desenvolvido anteriormente, e com a finalidade de estudar uma nova geometria de pilar a reforçar, desenvolveu-se um novo modelo de elementos finitos através do *software* ABAQUS v.6.10 [9]. A nova geometria apresenta maior área transversal no pilar de betão armado. O pilar apresenta uma secção de  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  e a viga apresenta uma secção de  $350 \times 500 \text{ mm}^2$ , face ao pilar com  $260 \times 260 \text{ mm}^2$  de secção transversal e a viga com  $260 \times 400 \text{ mm}^2$  anteriormente considerados [5,7]. A fim de simular corretamente o comportamento dos pilares reforçados com a técnica de *steel caging*, atendeu-se a diversos aspectos, tais como, os efeitos geométricos de segunda ordem, o comportamento não linear do betão e do aço, a existência de uma argamassa com a função de servir como interface entre o pilar e o aço do reforço, e a existência de um capitel na ligação do pilar à viga [7].

#### 4.1 Tipo de elementos finitos utilizados, condições de fronteira e carregamento

Por simplificação, e seguindo a metodologia do trabalho anterior, apenas um quarto do provete foi modelado numericamente, aplicando as condições de simetria exigidas em cada plano [7], tal como apresentado na Fig. 2. Todos os elementos de betão, de reforço e argamassa de ligação entre estes foram modelados usando elementos hexaédricos com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó, com integração reduzida e *hourglass control* (C3D8R).

As armaduras longitudinais e transversais foram modeladas usando elementos de treliça com 2 nós e deslocamento linear, permitindo apenas a transmissão de carga axial (T2D3). De forma a garantir uma ligação perfeita entre o betão e o aço das armaduras, foi utilizada a opção *\*Embedded Element* do ABAQUS.

Na extremidade de cada pilar foi colocada uma peça metálica, para facilitar a aplicação de carga axial na extremidade, tal como representada na Fig. 3.



**Fig. 3:** Modelo de elementos finitos representativo de um pilar de betão armado reforçado com cantoneiras e presilhas metálicas

Neste mesmo ponto, foi imposta uma condição de apoio que permite o deslocamento longitudinal ao longo do eixo do pilar. Esta peça representa-se por elementos sólidos tetraédricos lineares com 4 nós. A carga de corte introduz o momento fletor no pilar e é aplicada em toda a secção superior da viga após a aplicação da carga axial, com controle de deslocamentos.

O Método de *Newton-Raphson* no ABAQUS foi utilizado para resolver os sistemas de equações. Devido ao comportamento não linear dos modelos, o método resolveu sistemas de equações não lineares, por incrementos e iterações, usando a tangente da matriz de rigidez.[7].

#### 4.2 Modelos constitutivos dos materiais

O modelo adotado no ABAQUS para simular a plastificação do betão, assume dois mecanismos de rotura: esmagamento do betão à compressão e fendilhação. Submetido à tração, a resposta tensão-deformação ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) segue uma relação elástica linear até ser atingido o valor de resistência à tração ( $f_{ct}$ ), sendo a resposta pós-pico dada por uma parábola, com concavidade negativa. Quando o betão está comprimido, a relação entre a tensão e a deformação é proposta por Saenz [10] (equação polinomial de segundo grau).

Os coeficientes de *Poisson* do betão e do aço e os módulos de elasticidade e as tensões de cedência do aço e dos elementos de reforço apresentados, foram introduzidos conforme os modelos numéricos testados e validados [7], possibilitando a comparação coerente dos resultados. O módulo de elasticidade do betão é obtido com base no valor da resistência à compressão, através das equações propostas no ACI [11]. O coeficiente de *Poisson* é de 0.2.

O comportamento de todos os elementos de aço (armaduras e reforço) é elasto-plástico e idêntico quando sujeito a tanto a tensões de tração como de compressão. O módulo de elasticidade e tensão de cedência para as armaduras são de 200 GPa e de 500 MPa respetivamente, e para os elementos de reforço, 210 GPa e 275 MPa. Para os elementos metálicos o coeficien-

te de *Poisson* é 0.3. A peça metálica, colocada na extremidade do pilar para aplicação da carga axial, tem um comportamento elástico linear e com o mesmo modo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* que os elementos metálicos de reforço.

A argamassa que permite o contacto ente o pilar e o reforço apresenta um comportamento elástico linear, pois nos resultados experimentais de Garzón-Roca *et al* [8], não foi detetado qualquer tipo de dano nestes elementos. O correspondente coeficiente de *Poisson* é de 0.2 e módulo de elasticidade são 25 GPa [7].

### 4.3 Interação entre os vários componentes

A interação entre as cantoneiras e presilhas metálicas e a argamassa de ligação é simulada por duas superfícies de contacto. O comportamento na direção normal foi modelado como “*hard contact*”. Esta interação não permite a penetração entre as duas superfícies e não existe nenhum limite para a pressão de contacto. Na direção tangencial, o comportamento foi modelado através do modelo de fricção clássico e isotrópico de Coulomb, definindo um coeficiente de fricção de 0.2 e sem coesão de contacto.

A interação entre a argamassa de ligação e o betão do pilar é feita pela opção *\*Tie* do ABAQUS, devido à rugosidade destes dois materiais, que é muito superior à que se verifica na interação entre as cantoneiras e presilhas metálicas e a argamassa.

Os capitéis foram soldados ao aço de reforço através da opção *\*Tie* do ABAQUS. O contacto entre estes e a ligação da viga com o pilar foi modelado sem fricção e com “*hard contact*” na direção normal, permitindo que as superfícies se separem quando em tração [7].

### 4.4 Estudo paramétrico

Com base no novo modelo de elementos finitos, foi realizado um estudo paramétrico com vários modelos que diferem entre si de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Parâmetros estudados

Modelo	Reforço			Materiais		
	Capitel	Cantoneiras	Nº de presilhas	$f_c$ (MPa)	$f_{yL}$ (MPa)	Armadura Long.
REF	L70.7	L60.6	5	12	275	4 $\phi$ 12
C50	<u>L50.5</u>	L60.6	5	12	275	4 $\phi$ 12
C90	<u>L90.9</u>	L60.6	5	12	275	4 $\phi$ 12
L40.4	L70.7	<u>L40.4</u>	5	12	275	4 $\phi$ 12
L50.5	L70.7	<u>L50.5</u>	5	12	275	4 $\phi$ 12
L70.7	L70.7	<u>L70.7</u>	5	12	275	4 $\phi$ 12
L80.8	L70.7	<u>L80.8</u>	5	12	275	4 $\phi$ 12
3strips	L70.7	L60.6	<u>3</u>	12	275	4 $\phi$ 12
fyL355	L70.7	L60.6	5	12	<u>355</u>	4 $\phi$ 12
fc20	L70.7	L60.6	5	<u>20</u>	275	4 $\phi$ 12
fc30	L70.7	L60.6	5	<u>30</u>	275	4 $\phi$ 12
As10	L70.7	L60.6	5	12	275	<u>4<math>\phi</math>10</u>
As16	L70.7	L60.6	5	12	275	<u>4<math>\phi</math>16</u>
As20	L70.7	L60.6	5	12	275	<u>4<math>\phi</math>20</u>

As propriedades que se fizeram variar, em relação ao modelo de referência, foram [7] (ver Tabela 1):

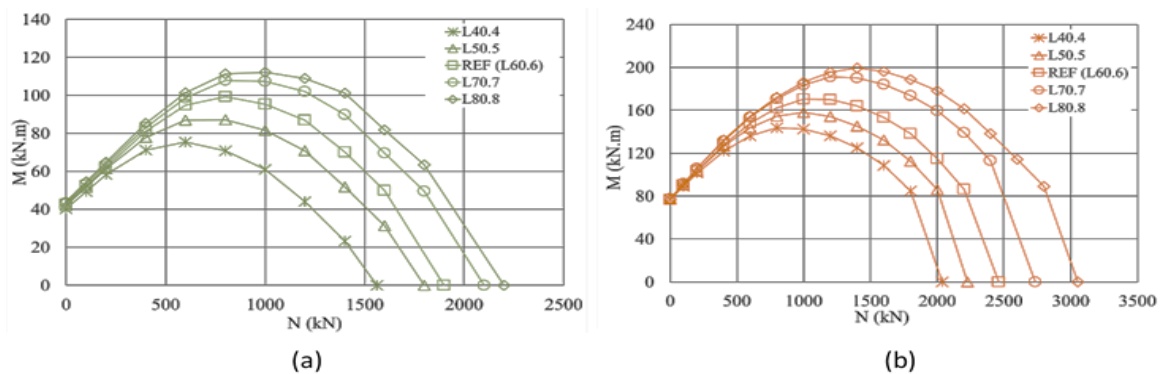
- Variação na geometria e na extensão dos capitéis (C50 e C90);
- Variação das dimensões das cantoneiras (L40.4, L50.5, L70.7 e L80.8);
- Redução no número de presilhas (3 strips);
- Resistência à compressão do betão ( $f_{c20}$  e  $f_{c30}$ ): aumento deste valor;
- Tensão de cedência do aço do reforço ( $f_{yL355}$ ), superior à de referência;
- Variação da secção transversal das armaduras (As10, As16, As20).

## 5. Análise e comparação de Resultados

Obtidos os diagramas de interação entre a carga axial e o momento fletor, procedeu-se à sua análise e fez-se uma comparação entre estes e os resultados obtidos no estudo levado a cabo por Garzón-Roca et al [7]. Esta análise permitiu avaliar a influência da nova geometria e verificar se o aumento do tamanho dos pilares altera ou não o comportamento global do reforço utilizado.

### 5.1 Influência do tamanho das cantoneiras

Na Fig. 4 apresenta-se os diagramas M-N que resultam da utilização de diferentes tamanhos de cantoneiras no reforço dos pilares BA. Comparam-se os resultados obtidos no presente trabalho (Fig. 4.b) com os que foram obtidos por Garzon-Roca et al [7] (Fig. 4.a).



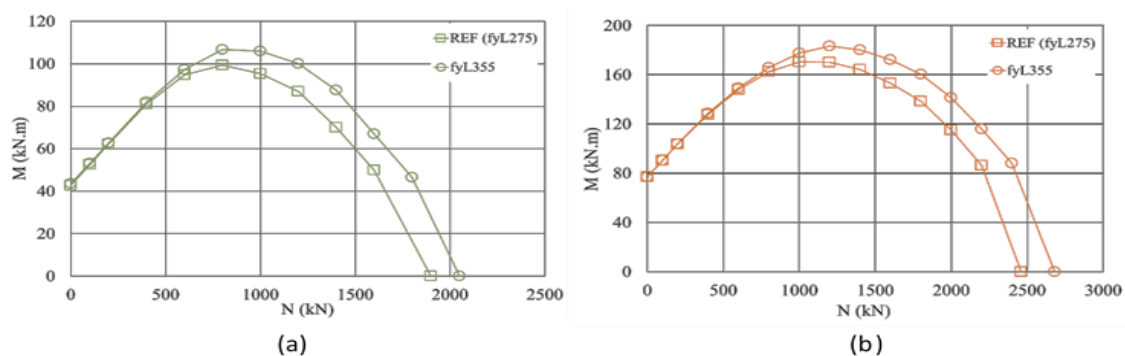
**Fig. 4:** Diagramas N-M para a variação no tamanho das cantoneiras: (a) resultados de Garzon-Roca et al [7]; (b) resultados provenientes do novo estudo paramétrico

É expectável que para uma dimensão maior das cantoneiras, a resistência de um pilar reforçado com *steel caging* seja maior. No entanto, nos resultados apresentados na Fig. 4, o aumento das dimensões das cantoneiras, provoca um aumento quase insignificante dos momentos fletores quando os valores das cargas axiais variam entre cerca de 0% e 30% do valor de  $N_{máx}$ . Para cargas axiais superiores, verificou-se para ambos os casos, que quanto maior a dimensão da cantoneira, maior o correspondente valor de resistência à flexão.

### 5.2 Influência da tensão de cedência dos elementos de reforço

Na Fig. 5 apresenta-se os diagramas M-N que resultam da variação do valor da tensão de cedência do material utilizado no reforço (cantoneiras e presilhas). Comparam-se os resultados obtidos no presente trabalho (Fig. 5.b) com os que foram anteriormente obtidos por Garzon-Roca et al [7] (Fig. 5.a).





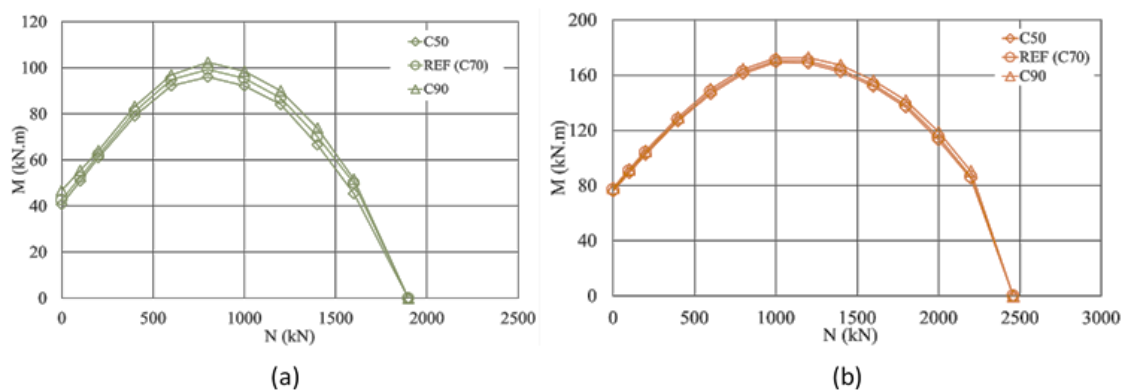
**Fig. 5:** Diagramas N-M para o aumento da tensão de cedência no material de reforço: (a) resultados de Garzon-Roca et al [7]; (b) resultados provenientes do novo estudo paramétrico

Aumentando a tensão de cedência dos elementos de reforço no pilar, aumenta a resistência à flexão no pilar.

Tal como aconteceu com a alteração das dimensões das cantoneiras, para cargas axiais até, aproximadamente 30% de  $N_{máx}$ , a influência do aumento da tensão de cedência na resistência à flexão é quase imperceptível. No entanto, a partir desse valor, o momento fletor aumenta entre 10% e 20% (consoante o aumento da carga axial) em todos os resultados apresentados na Fig. 5.

### 5.3 Influência do tamanho dos capitéis

Na Fig. 6 apresenta-se os diagramas M-N que resultam da variação das dimensões dos capitéis utilizados no reforço da ligação viga-pilar. Comparam-se os resultados obtidos no presente trabalho (Fig.6b) com os obtidos por Garzon-Roca et al [7] (Fig.6a).

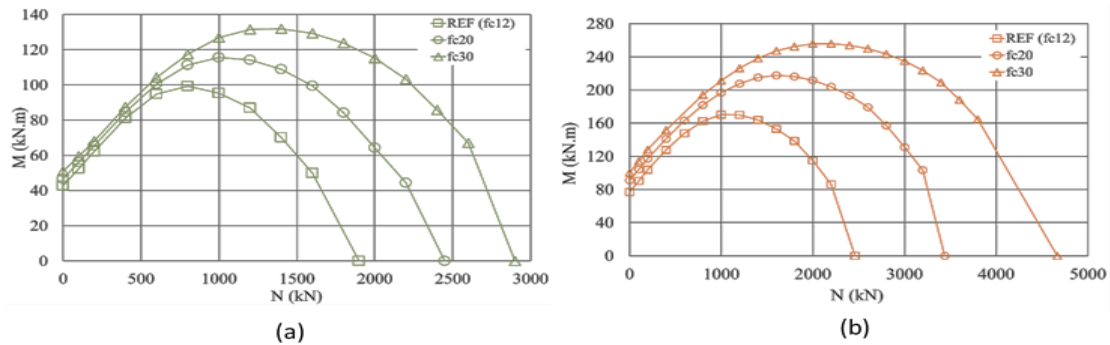


**Fig. 6:** Diagramas N-M para a alteração nas dimensões dos capitéis: (a) resultados de Garzon-Roca et al [7]; (b) resultados provenientes do novo estudo paramétrico

Pela observação dos gráficos da Fig. 6, pode-se constatar que o aumento das dimensões dos capitéis tem muito pouca influência na resistência à flexão do pilar, uma vez que os aumentos são de apenas 1% a 2%.

### 5.4 Influência da resistência à compressão do betão

Na Fig. 7 apresenta-se os diagramas M-N que resultam da variação do valor da resistência à compressão do betão utilizado no fabrico dos pilares BA. Comparam-se os resultados obtidos no presente trabalho (Fig. 7.b) com os que foram obtidos por Garzon-Roca et al [7] (Fig. 7.a).

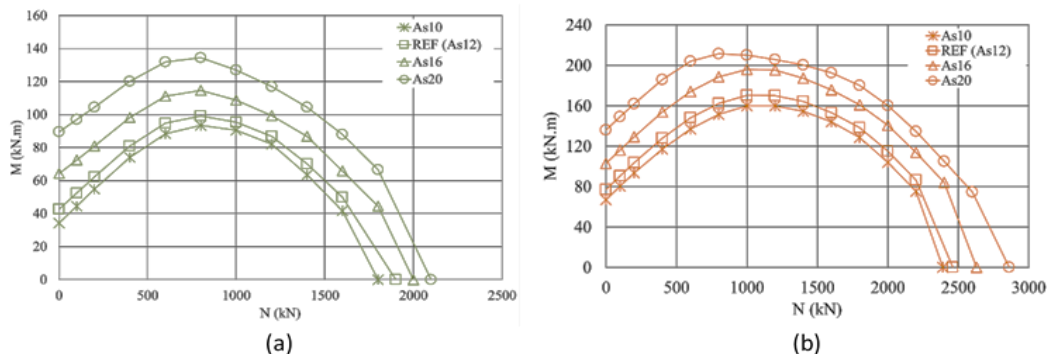


**Fig. 7:** Diagramas N-M para o aumento da resistência à compressão do betão: (a) resultados de Garzon-Roca et al [7]; (b) resultados provenientes do novo estudo paramétrico

Como se pode observar em ambos os resultados da Fig. 7, a resistência à compressão do betão, tem uma influência muito significativa na resistência à flexão do pilar. Porém, esta influência é pouco significativa para valores de carga axial baixos, entre 0 e 30% de  $N_{máx}$ .

### 5.5 Influência da área de armadura longitudinal

Na Fig. 8 apresenta-se os diagramas M-N que resultam da variação do valor da área de armadura longitudinal. Comparam-se os resultados obtidos no presente trabalho (Fig. 8.b) com os que foram obtidos por Garzon-Roca et al [7] (Fig. 8.a).



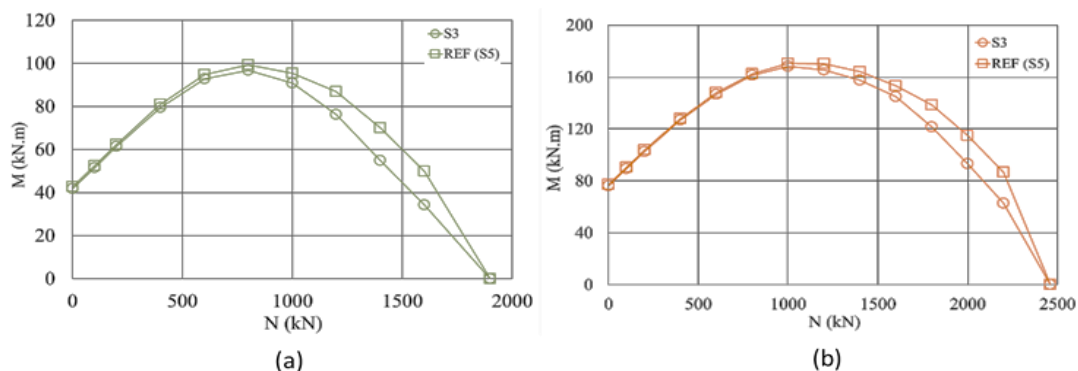
**Fig. 8:** Diagramas N-M para a variação da área de armadura longitudinal: (a) resultados de Garzon-Roca et al [7]; (b) resultados provenientes do novo estudo paramétrico

Com a variação da área de armadura longitudinal, o comportamento global do pilar quase não se altera. De uma forma geral, a resistência à flexão do pilar cresce à medida que se aumenta a área de armadura longitudinal e esse efeito é evidente em todas as situações de carregamento, mesmo quando o nível de esforço axial é baixo. Para estes níveis de esforço axial, a influência do reforço (cantoneiras e presilhas) quando tracionado é reduzida, sendo a resistência à flexão assegurada pelas armaduras. Deste modo, verifica-se que a área de armadura longitudinal é o único parâmetro que influencia a resistência à flexão para níveis de esforço axial mais baixos.

### 5.6 Influência da quantidade de presilhas

Na Fig. 9 apresenta-se os diagramas M-N que resultam da variação da quantidade de presilhas colocadas ao longo do pilar. Comparam-se os resultados obtidos no presente trabalho (Fig. 9.b) com os que foram anteriormente obtidos por Garzon-Roca et al [7] (Fig. 9.a).





**Fig. 9:** Diagramas N-M para a variação da quantidade de presilhas: (a) resultados de Garzón-Roca et al [7]; (b) resultados provenientes do novo estudo paramétrico

Para ambas as propostas apresentadas na Fig. 9, verifica-se que para um menor número de presilhas, menor é a resistência à flexão do pilar. Embora esta diminuição da resistência seja sempre reduzida, é para as cargas axiais menores que se verifica uma influência quase nula, em ambas as propostas. Esta perda de resistência deve-se à redução no confinamento que resulta da diminuição de presilhas aplicadas.

### 5.7 Influência da Geometria

Pela análise das curvas anteriores, respetivas a cada estudo paramétrico, verifica-se que a introdução de uma nova geometria no estudo numérico (aumento das dimensões do pilar e da viga), fez aumentar entre 50% e 60% os valores da resistência à compressão e da resistência à flexão dos modelos. Mesmo para esforços axiais mais reduzidos, a resistência à flexão é maior nos provetes com geometria maior. No geral, as curvas M-N obtidas com o novo estudo paramétrico seguem a mesma tendência que as apresentadas por Garzón-Roca et al [7], mas com resistência à compressão e à flexão maior.

## 6. Conclusões

A partir do estudo paramétrico desenvolvido, obteve-se informações essenciais para o estudo do comportamento de um pilar reforçado com *steel caging* sujeito a cargas axiais e momentos fletores, com a introdução de capitéis de aço na ligação entre a viga e o pilar.

A aplicação do reforço, (cantoneiras, presilhas e capitéis), e o aumento tensão de cedência do aço destes elementos, pouca influência têm na resistência à flexão quando são aplicados esforços axiais reduzidos. No entanto, a resistência à flexão é tanto maior quanto maiores forem as dimensões das cantoneiras e dos capitéis, a tensão de cedência do aço de reforço, e a quantidade de presilhas aplicadas.

Ainda relativamente ao reforço, foi possível verificar que a quantidade de presilhas influencia o nível de confinamento imposto ao pilar, que é tanto maior quantas mais presilhas forem aplicadas. Relativamente aos capitéis, verificou-se que é o elemento de reforço que menos influencia o comportamento do pilar.

Relativamente aos materiais utilizados, a influência da resistência à compressão do betão é tanto maior quanto maior for a carga axial aplicada. O aumento da resistência à compressão traduz-se em maiores valores de esforço axial máximo,  $N_{máx}$ , e consequentemente maior resistência à flexão.

Ao contrário dos parâmetros mencionados, o aumento da secção transversal da armadura longitudinal é o que mais influencia o comportamento do pilar, pois mesmo para esforços axiais reduzidos, quanto maior for a área da secção das armaduras, maior é a resistência à flexão. O aumento da geometria dos provetes influenciou o aumento da resistência à flexão em mais de 50%, aumentando consequentemente a respetiva resistência à compressão, em todos os parâmetros analisados.

As conclusões retiradas dos resultados obtidos por Garzon-Roca et al [7] são as mesmas dos resultados provenientes do novo estudo paramétrico, pois as curvas que provêm de ambos os estudos apresentam uma tendência semelhante, variando apenas nos valores de momento fletor e esforço axial.

## Referências

- [1] Adam, J. M., Jiménez, E., Calderón, P. a., Ivorra, S., & Pallares, F. J. (2008). Column–joint assembly in RC columns strengthened by steel caging. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, 161(December), 337–348.
- [2] Fernandes, G., Tomé, L., Santos, H., & Almeida, R. (2002). Reforços Estruturais com Perfis e Chapas de Aço, ConstruíLink Press, Nº10.
- [3] Miguel, B., & Pereira, G. (2012). Modelos Analíticos para a Previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono. Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança.
- [4] Adam, J. M. (2007). Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips, *Steel and Composite Structures*, 7(5), 405–419.
- [5] Garzón-Roca, J., Adam, J. M., & Calderón, P. a. (2011). Behaviour of RC columns strengthened by steel caging under combined bending and axial loads. *Construction and Building Materials*, 25, 2402–2412.
- [6] Calderón, P. A., Adam, J. M., Ivorra, S., Pallarés, F. J., & Giménez, E. (2009). Design strength of axially loaded RC columns strengthened by steel caging. *Materials and Design*, 30(10), 4069–4080.
- [7] Garzón-Roca, J., Adam, J. M., Calderón, P. a., & Valente, I. B. (2012). Finite element modelling of steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment. *Engineering Structures*, 40, 168–186.
- [8] Garzón-Roca, J., Ruiz-Pinilla, J., Adam, J. M., & Calderón, P. a. (2011). An experimental study on steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment. *Engineering Structures*, 33(2), 580–590.
- [9] ABAQUS 6.10. (2010). Abaqus Analysis User’s Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [10] Saenz LP. Discussion of “Equation for the stress–strain curve of concrete” by Desayi P, Krishnan S. *ACI Journal* 1964;61:1229–35
- [11] ACI Committee 318. (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)*. American Concrete Institute (Vol.2007).