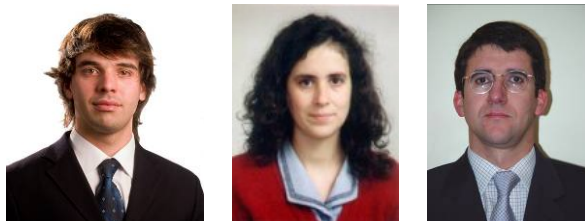


ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO ATÉ À ROTURA DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

Matos, J. C.¹, Valente, I.¹, Cruz, P.J.S.²

¹ ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho

² ISISE, Escola de Arquitectura, Universidade do Minho



RESUMO

O presente artigo incide sobre a análise experimental do comportamento de um conjunto de vigas de betão armado, ensaiadas até rotura no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST-UM). Estas foram construídas e betonadas em simultâneo, apresentando diferentes distribuições de armadura longitudinal, recobrimento e espaçamento de armadura transversal. Procedeu-se ao ensaio de um total de 36 vigas simplesmente apoiadas, e 32 vigas apoiadas num dos extremos e encastradas no outro. O carregamento aplicado correspondeu a duas cargas concentradas, aplicadas a 1/3 e 2/3 do vão. Algumas das vigas apresentaram roturas típicas de flexão e, outras, de corte. Apresentam-se os principais resultados experimentais e os resultados obtidos com uma análise de sensibilidade, que permitiu aferir a relação existente entre armaduras utilizadas, valores de recobrimento e condições de apoio, com os diferentes modos de rotura.

1- INTRODUÇÃO

As vigas em betão armado apresentam, na maioria das situações, roturas tipo de flexão, com esmagamento do betão ou extensão excessiva na armadura, ou de corte. Apesar de o seu comportamento se encontrar muito bem estudado, verifica-se que a alteração dos valores de alguns parâmetros pode influenciar o respectivo modo de rotura.

Neste âmbito, procedeu-se a um estudo experimental, com o objectivo de relacionar os diferentes modos de rotura obtidos e a evolução da fendilhação, com factores como a percentagem de armadura longitudinal, o espaçamento da armadura transversal, o recobrimento da armadura principal, e as condições de apoio existentes. As armaduras utilizadas em todas as vigas são do mesmo fornecimento e todas as vigas foram betonadas ao

mesmo tempo. As vigas ensaiadas foram agrupadas por tipologias. Contudo, verificou-se a existência de uma variabilidade de resultados em vigas pertencentes a um mesmo subconjunto, o que permitiu identificar outros parâmetros influentes.

Este estudo teve também um carácter didáctico, pois permitiu salientar certos aspectos do comportamento das respectivas vigas. Nesta perspectiva, dimensionaram-se modelos próprios para provocar situações típicas de comportamento de rotura. Os resultados obtidos sob a forma experimental vieram a comprovar os cálculos realizados analiticamente, segundo os actuais códigos (EN 1992-1-1, 2004). Recentemente, outros autores desenvolveram análises semelhantes com vigas simplesmente apoiadas, tendo-se obtido resultados bastante próximos (Pires *et al.*, 2008).

2- ENSAIOS EXPERIMENTAIS

2.1 - Ensaios de Caracterização dos Materiais

Numa primeira fase, procedeu-se a uma análise de alguns parâmetros dos materiais constituintes, nomeadamente, aço e betão. O aço utilizado foi da classe A500NR e o betão de classe C25/30.

Efectuaram-se ensaios de tracção uniaxial do aço utilizado, que permitiram aferir parâmetros tais como módulo de elasticidade, tensão de cedência, extensão última e tensão de rotura.

Foram utilizados 6 provetes, para cada diâmetro de armadura utilizada, $\phi 4$, a colocar como armadura de esforço transversal $\phi 6$, $\phi 8$ e $\phi 10$, a colocar como armadura longitudinal (tabelas 1 e 2).

Tabela 1 – Parâmetros do aço ($\phi 4$).

Parâmetro	Unidades	Valor médio
Módulo elasticidade	GPa	195.39
Tensão cedência	MPa	356.56
Tensão rotura	MPa	483.86
Extensão última	%	13.20

Tabela 2 – Parâmetros do aço ($\phi 6$, $\phi 8$ e $\phi 10$).

Parâmetro	Unidades	Valor médio
Módulo elasticidade	GPa	197.05
Tensão cedência	MPa	542.30
Tensão rotura	MPa	655.64
Extensão última	%	12.27

Os ensaios nos aços foram realizados de acordo com a norma NP ENV 10002-1 (2001) sobre provetes com um comprimento de 500 mm (figuras 1a e 1b).

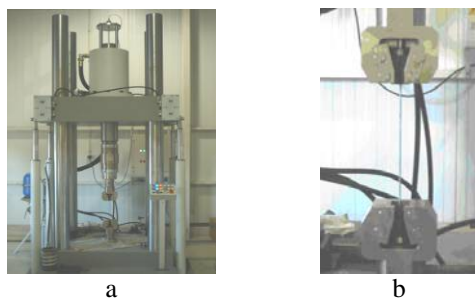


Figura 1 – a) Ensaio de tracção. b) Provette.

Para o betão realizaram-se ensaios de compressão uniaxial (figura 2a), em 6 cilindros, de forma a caracterizar o seu

módulo de elasticidade, a extensão de rotura e a resistência à compressão.

Foram, ainda, realizados ensaios de energia de fractura (figura 2b), em 6 provetes, que permitiram determinar, a energia de fractura e a resistência à tracção do material.

A tabela 3 apresenta os principais resultados.

Tabela 3 – Parâmetros do betão.

Parâmetro	Unidades	Valor médio
Módulo elasticidade	GPa	28.01
Resistência compressão	MPa	30.77
Extensão cedência	‰	2.79
Energia fractura	N/m	103.91
Resistência tracção	MPa	2.67

Os ensaios de compressão uniaxial no betão foram realizados de acordo com norma NP EN 12390-3 (2003). Cada cilindro foi ensaiado aos 28 dias, apresentando uma altura de 290 mm e 150 mm de diâmetro.

Os ensaios de energia de fractura foram realizados de acordo com norma RILEM TC50-FMC (1985), tendo, cada provete, a dimensão $850 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, e um entalhe de 25 mm de profundidade e 5 mm de espessura.

Estas vigas, com 800 mm de vão, foram submetidas a um carregamento pontual, até atingirem a rotura.

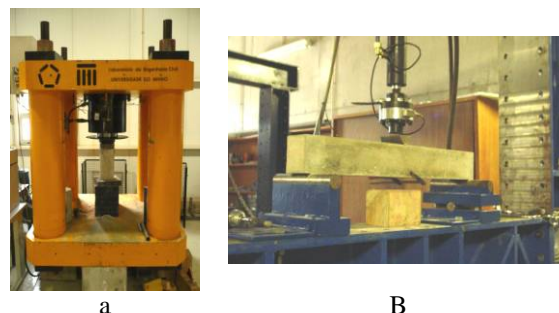


Figura 2 – a) Ensaio compressão. b) Ensaio energia fractura.

2.2 - Vigas Simplesmente Apoiadas

O ensaio experimental aqui apresentado consistiu no carregamento, até à rotura de vigas de betão armado, com

diferentes distribuições de armadura longitudinal e espaçamentos de armadura transversal (figuras 3, 4 e 5).

As vigas, simplesmente apoiadas e com 1.50 m de vão, foram submetidas a duas cargas (P) colocadas a 1/3 e 2/3 do vão.

Cada viga foi apoiada sobre dois roletes, um fixo e outro móvel, colocados simetricamente em relação ao seu eixo de simetria, de forma a torná-la isostática. Estas apresentam uma secção rectangular de 75×150 mm.



Figura 3 – Imagem do ensaio.

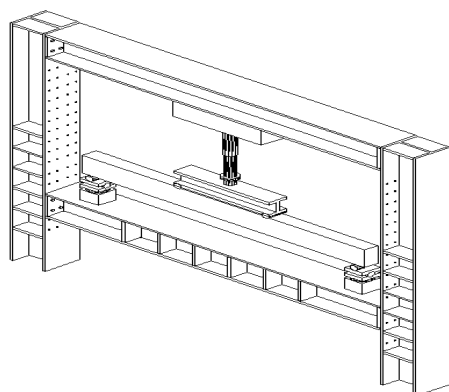


Figura 4 – Representação do ensaio.

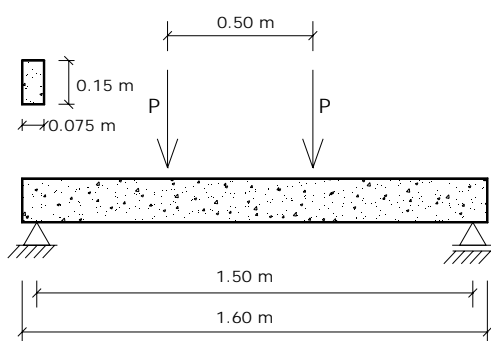


Figura 5 – Esquema do ensaio.

O betão utilizado foi o mesmo, em todas as vigas, bem como, o aço, tendo-se utilizado diâmetros de $\phi 6$, $\phi 8$ e $\phi 10$ para armadura longitudinal, e de $\phi 4$ para a

armadura transversal. Adoptou-se um recobrimento de 1.0 cm.

O ensaio foi realizado com controlo de deslocamento a 0.04 mm/s. Registou-se o valor da carga aplicada, por um actuador electromecânico e o deslocamento a meio vão, através de um transdutor de deslocamento (figura 9a).

Foram ensaiadas 36 vigas, betonadas na mesma altura, mas com diferentes distribuições de armadura longitudinal e transversal (tabela 4).

Tabela 4 – Número de vigas ensaiadas.

Trans.	Long.	@0.075(Meio Vão) + @0.1583 (Apoios)	@0.10	@0.125(Meio Vão) + @0.2875 (Apoios)	@0.15	@0.15(Meio Vão) + @0.175 (Apoios)	@0.175	@0.187	@0.30
2 $\phi 6$	-	-	1	2	-	-	1	-	-
3 $\phi 6$	-	2	-	-	-	-	-	-	-
2 $\phi 8$	-	3	-	2	-	1	1	-	-
1 $\phi 8$ + 2 $\phi 6$	-	-	-	1	-	-	-	-	-
4 $\phi 6$ (*)	-	-	-	1	-	-	-	-	-
1 $\phi 6$ + 2 $\phi 8$	-	1	1	-	-	1	-	-	-
3 $\phi 8$	-	1	-	-	1	-	-	-	1
2 $\phi 10$	3	11	-	-	-	-	-	-	-
3 $\phi 10$	-	1	-	-	-	-	-	-	-

(*) Os varões foram colocados em sobreposição, em altura, 2 $\phi 6$ +2 $\phi 6$.

2.3 - Vigas Parcialmente Encastradas

Seguidamente procedeu-se ao ensaio de um conjunto de vigas, semelhantes às descritas no ponto anterior, mas com a particularidade de se encontrarem encastradas numa das extremidades (figuras 6, 7 e 8). Dado o facto da estrutura se tornar hiperstática, foi necessário, para além da colocação de um transdutor de deslocamento a meio vão (figura 9a), introduzir uma célula de carga de 200 kN, de forma a registar a reacção no apoio

(figura 9b) e, consecutivamente, obter o equilíbrio do sistema estrutural.



Figura 6 – Foto da viga ensaiada.

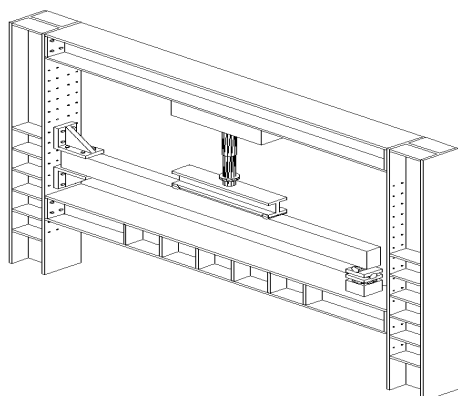


Figura 7 – Esboço da viga ensaiada.

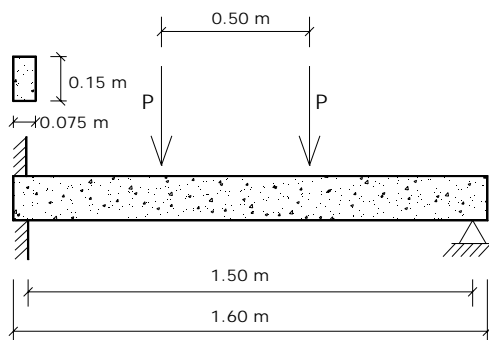


Figura 8 – Esquema da viga ensaiada.

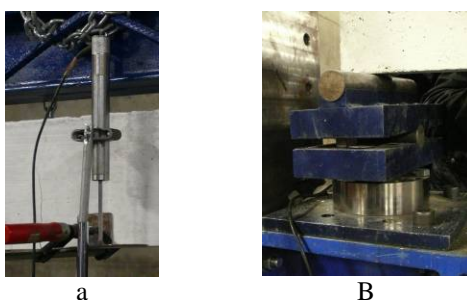


Figura 9 – a) Transdutor de deslocamento. b) Célula de carga.

Agruparam-se as 32 vigas ensaiadas de acordo com a armadura longitudinal, o espaçamento da armadura transversal e o recobrimento utilizado (tabela 5).

Tabela 5 – Número de vigas ensaiadas.

Trans. Long.	@0.08 (Meio vão) + @0.03 (Apoios)		@0.08 (Meio vão) + @0.05 (Apoios)	
	1.0 cm	2.0 cm	1.0 cm	2.0 cm
2 ϕ 8 (Superior) + 2 ϕ 8 (Inferior)	3	2	4	2
2 ϕ 8 (Superior) + 3 ϕ 6 (Inferior)	2	2	3	4
2 ϕ 6 (Superior) + 2 ϕ 6 (Inferior)	3	2	3	2

O encastramento foi materializado com a colocação de duas placas de aço apertadas contra a viga. As figuras 10a e 10b apresentam, respectivamente, um pormenor do encastramento utilizado e do apoio de roletes.

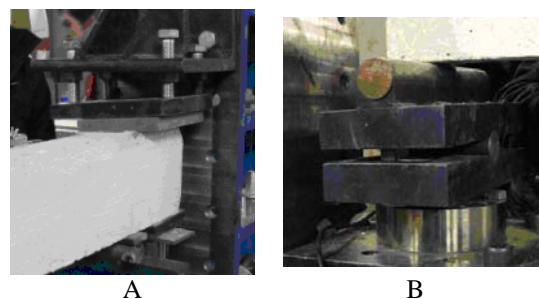


Figura 10 – a) Encastramento. b) Apoio de roletes móvel.

3- MODOS DE ROTURA

3.1 - Vigas Simplesmente Apoiadas

Durante os ensaios das vigas em análise, verificaram-se modos de rotura por flexão, com extensão excessiva na armadura ou esmagamento do betão, e por corte. Agruparam-se as 36 vigas ensaiadas por tipologias, apresentando-se, neste ponto, os resultados de 4 tipologias que, de certo modo, englobam a totalidade dos modos de rotura verificados (tabela 6). Correspondem, de acordo com tabela 4, a 19 dos casos em análise.

Tabela 6 – Tipologias em Análise.

Tipologia	Armadura long.	Armadura trans.	Modo de rotura
1	3 ϕ 6	@0.10	Flexão – Rotura aço
2	2 ϕ 8	@0.10	Flexão – Esmagamento betão
3	2 ϕ 10	@0.10	Corte / Flexão – Esmagamento betão
4	2 ϕ 10	@0.075 (Apoios) + @0.158 (Meio vão)	Flexão – Esmagamento betão

A tabela 7 apresenta, para as tipologias em causa, uma descrição das áreas de armadura utilizadas.

Tabela 7 – Áreas de Armadura por tipologia.

Tipologia	A_s (Inferior)	A_s' (Superior)	A_{sw}/s
	cm ²	cm ²	cm ² /m
1	0.848	0.251	2.513
2	1.005	0.251	2.513
3	1.571	0.251	2.513
4	1.571	0.251	3.351 (Apoios) + 2.513 (Meio vão)

A tipologia 1 apresenta pouca área de armadura à tracção, e, portanto, será de esperar uma rotura do tipo frágil, de flexão, associada a uma elevada extensão na armadura.

As tipologias 3 e 4 apresentam maiores áreas de armadura à tracção. São, por isso, mais susceptíveis a roturas de corte. No entanto, verifica-se que a tipologia 4 apresenta uma maior quantidade de estribos que tem, como consequência, a inversão desta tendência, não apresentando, por isso, qualquer rotura por corte.

A tipologia 2, por sua vez, não apresenta elevadas áreas de armadura longitudinal, e apresenta uma área de estribos dentro do normal, o que, poderá levar a concluir que se encontra bem dimensionada e que o tipo de rotura obtido, é uma rotura com aviso, de flexão, associada a um esmagamento do betão.

As figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam os principais resultados da respectiva análise, nomeadamente, a carga aplicada pelo actuador e o deslocamento registado pelo transdutor de deslocamento.

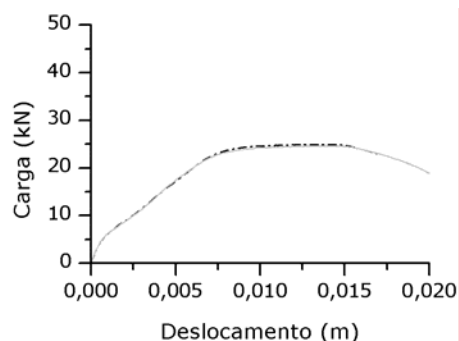


Figura 11 – Resultado tipologia 1.

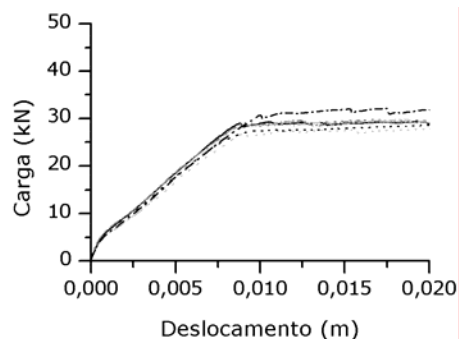


Figura 12 – Resultado tipologia 2.

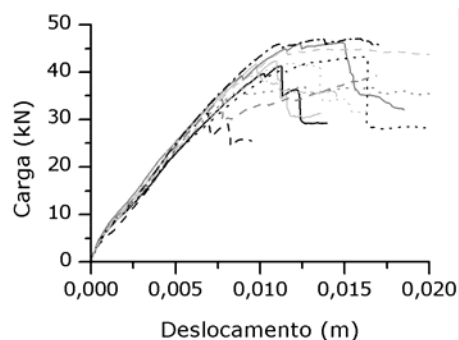


Figura 13 – Resultado tipologia 3.

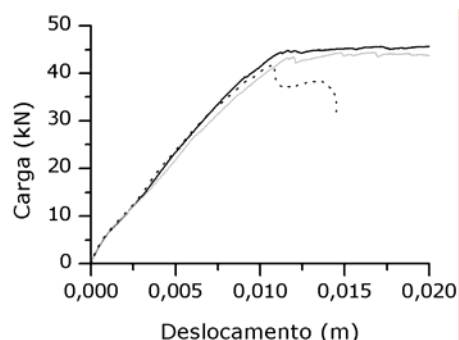


Figura 14 – Resultado tipologia 4.

A rotura da tipologia 1 apesar de ser uma rotura por flexão, não deixa de ser uma rotura pouco dúctil, com o

aparecimento de uma fissura de elevada abertura (figura 15). As fendas encontram-se pouco distribuídas, sendo, a sua abertura, considerável. A viga é muito mais deformável que as restantes tipologias ensaiadas, resistindo a uma carga muito baixa.



Figura 15 – Rotura tipologia 1.

As tipologias 2 e 4 apresentam roturas semelhantes, por flexão, com esmagamento do betão (figura 16). O padrão de fendilhação é semelhante, obtendo-se várias fendas com pequena abertura, nomeadamente na zona de meio vão, onde se forma a rótula plástica. Trata-se de uma rotura controlada. Verifica-se, contudo, que a tipologia 2, por apresentar uma mais baixa percentagem de armadura, é mais deformável e resiste a uma carga inferior.



Figura 16 – Rotura tipologias 2 e 4.

A tipologia 3 apresenta, em alguma das situações, uma rotura típica por corte (figura 17) e, noutras, uma rotura por flexão com esmagamento do betão. Tal facto, poderá dever-se ou a um maior espaçamento entre armaduras transversais, fora do previsto, ou a uma falha na sua amarração (Pires *et al.*, 2008). As tipologias 3 e 4 apresentam cargas de rotura idênticas, como seria de prever.

A rotura por corte é, também, um tipo de rotura sem qualquer aviso, formando-se uma fenda entre o ponto de aplicação de carga e o apoio mais próximo (figura 18).

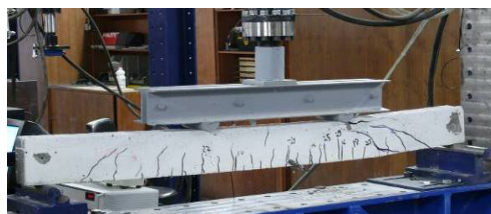


Figura 17 – Rotura tipologia 3.



Figura 18 – Pormenor rotura tipologia 3.

3.2 - Vigas Parcialmente Encastradas

Durante os ensaios das vigas parcialmente encastradas, apenas se verificaram modos de rotura por flexão com esmagamento do betão. Este facto deveu-se, essencialmente, ao reduzido espaçamento da armadura transversal, que reduziu a probabilidade de se obterem roturas por corte.

Deste modo, agruparam-se as 32 vigas ensaiadas por tipologias, apresentando-se, neste ponto, os resultados de 5 tipologias (tabela 8), correspondentes a 12 vigas ensaiadas (tabela 5).

A tabela 9 apresenta uma descrição das áreas de armadura utilizadas, para as tipologias em estudo.

A tipologia 1 apresenta uma área de armadura semelhante à da tipologia 2, diferenciando-se entre si pelo valor do recobrimento, inferior, no caso da tipologia 2.

A tipologia 3 difere da tipologia 1 no menor espaçamento entre estribos na zona junto aos apoios. A tipologia 4 apresenta uma maior área de armadura inferior, mantendo-se a da armadura superior. No caso da tipologia 5, ambas as áreas sofrem uma redução.

Nas vigas em análise registou-se o deslocamento a meio vão (figura 9a), a carga aplicada pelo actuador e a reacção no apoio (figura 9b). Deste modo, foi possível, através das equações de

equilíbrio da estática, determinar o valor do momento no encastramento.

Tabela 8 – Tipologias em Análise.

Tipologia	Armadura long.	Armadura trans.	Recob. (cm)	Modo de rotura
1	2 ϕ 8 (Superior) + 3 ϕ 6 (Inferior)	@0.08 (Meio vão) + @0.03 (Apoios)	2	Flexão – Esmagamento betão
2	2 ϕ 8 (Superior) + 3 ϕ 6 (Inferior)	@0.08 (Meio vão) + @0.03 (Apoios)	1	Flexão – Esmagamento betão
3	2 ϕ 8 (Superior) + 3 ϕ 6 (Inferior)	@0.08 (Meio vão) + @0.05 (Apoios)	2	Flexão – Esmagamento betão
4	2 ϕ 8 (Superior) + 2 ϕ 8 (Inferior)	@0.08 (Meio vão) + @0.03 (Apoios)	2	Flexão – Esmagamento betão
5	2 ϕ 6 (Superior) + 2 ϕ 6 (Inferior)	@0.08 (Meio vão) + @0.03 (Apoios)	2	Flexão – Esmagamento betão

Tabela 9 – Áreas de Armadura por tipologia.

Tipologia	A _s (Inferior)	A _s ' (Superior)	A _{sw} /s
	cm ²	cm ²	cm ² /m
1	0.848	1.005	3.141 (Meio vão) + 8.378 (Apoios)
2	0.848	1.005	3.141 (Meio vão) + 8.378 (Apoios)
3	0.848	1.005	3.141 (Meio vão) + 5.027 (Apoios)
4	1.005	1.005	3.141 (Meio vão) + 8.378 (Apoios)
5	0.565	0.565	3.141 (Meio vão) + 8.378 (Apoios)

Apresentando, as vigas, um grau de hiperstaticidade de um, será necessária a formação de duas rótulas plásticas, com capacidade de rotação que garanta a redistribuição de esforços, de modo a gerar o mecanismo de colapso associado.

De acordo com figura 19 a tipologia 1 apresenta uma fase inicial de comportamento elástico. Ao aparecer a primeira rótula, na zona de encastramento, a sua rigidez diminui, embora a viga continue a resistir a acréscimos de carga. A segunda rótula surge sob o ponto de aplicação da carga mais próxima do apoio simples. Forma-se, então, um mecanismo de rótulas plásticas e ocorre a rotura global da estrutura.

A figura 20 apresenta a variação do momento no encastramento com a reacção registada no apoio. Podemos concluir que a viga não apresenta um encastramento perfeito desde o início do ensaio. Assim sendo, numa primeira fase, o momento no encastramento mantém-se praticamente nulo para acréscimos da reacção de apoio. Este facto confirma um período de acomodação da viga, correspondente a um esmagamento do betão, em que o seu comportamento é semelhante ao de uma viga simplesmente apoiada. Numa fase seguinte verifica-se uma relação linear entre ambas variáveis, em que, o momento no encastramento aumenta à medida que a carga aplicada aumenta.

Segue-se uma fase, em que se verifica um aumento do momento no encastramento para uma mesma reacção no apoio. Pode-se, então, concluir que, apesar de aumentar a carga aplicada, a reacção registada no apoio simples se mantém, aumentando, por consequência, o momento no encastramento. Numa última fase, a carga aplicada (figura 20), a reacção no apoio e o momento no encastramento mantêm-se, entrando, a viga, em rotura.

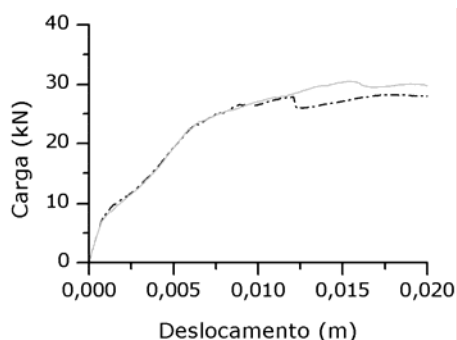


Figura 19 – Resultado tipologia 1.

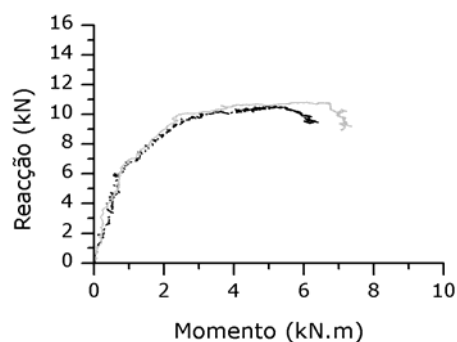


Figura 20 – Resultado tipologia 1.

Da análise das figuras 21 e 22, verifica-se que as vigas da tipologia 2 apresentam maior capacidade resistente que a tipologia 1, devido à diminuição do recobrimento, que corresponde a um aumento da altura útil. Da análise das figuras 23 e 24, verifica-se que a tipologia 3 apresenta um comportamento similar ao da tipologia 1. A diferença existente entre ambas teria maior relevo, caso o modo de rotura fosse por corte. Da análise das figuras 25 e 26, verifica-se que as vigas da tipologia 4 apresentam maior capacidade resistente que as vigas da tipologia 1, devido à maior percentagem de armadura inferior. Nesta situação, o padrão de comportamento entre ambas as tipologias é semelhante.

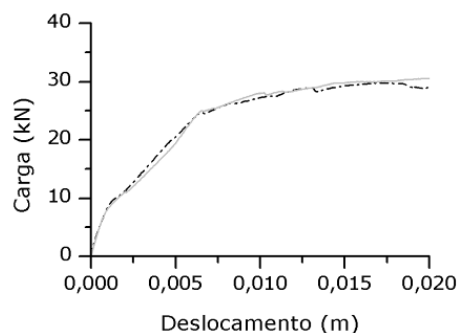


Figura 21 – Resultado tipologia 2.

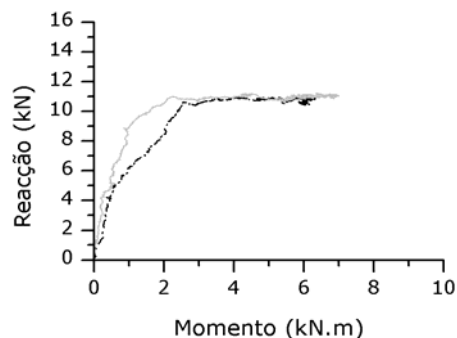


Figura 22 – Resultado tipologia 2.

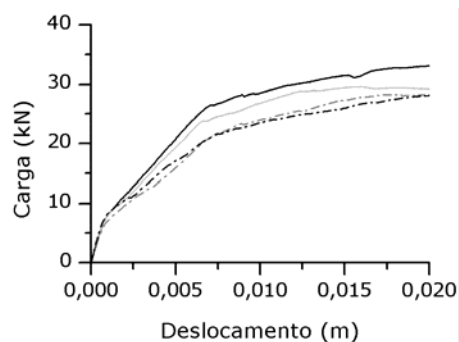


Figura 23 – Resultado tipologia 3.

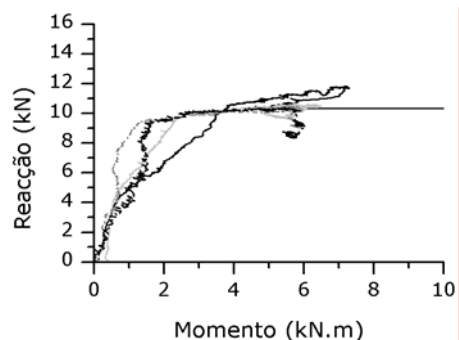


Figura 24 – Resultado tipologia 3.

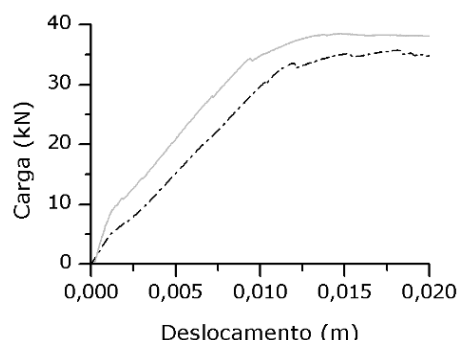


Figura 25 – Resultado tipologia 4.

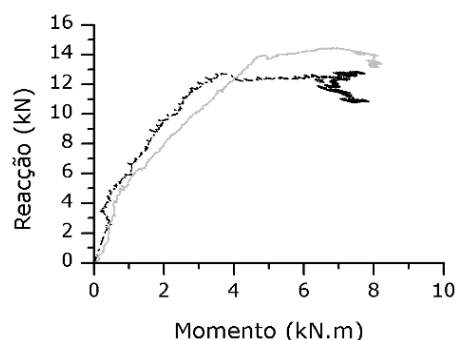


Figura 26 – Resultado tipologia 4.

A tipologia 5 corresponde a uma menor percentagem de armadura longitudinal, superior e inferior. Este facto leva a que as respectivas vigas apresentem uma menor resistência, face à tipologia 1 (figuras 27 e 28). O seu comportamento, modo rotura e padrão de fendilhação, mantêm-se idênticos aos das restantes

vigas, sendo que a formação da segunda rótula não é tão acentuada.

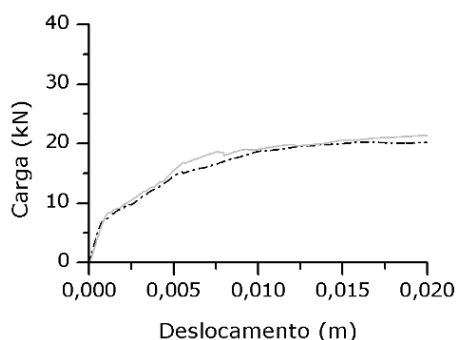


Figura 27 – Resultado tipologia 5.

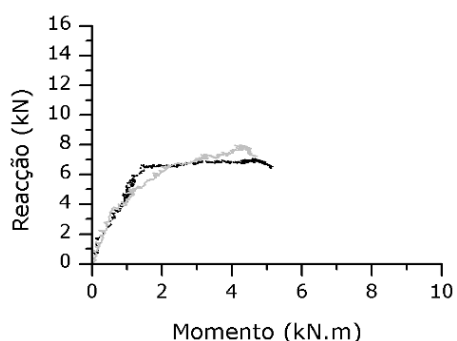
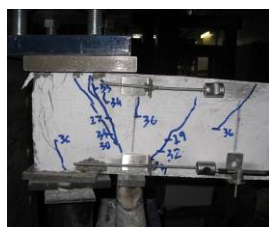


Figura 28 – Resultado tipologia 5.

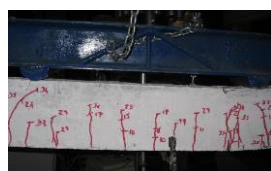
As vigas ensaiadas apresentam um comportamento idêntico, que se caracteriza pela formação de um mecanismo de colapso (figura 29), identificado pelo aparecimento de duas rótulas plásticas, no encastramento (figura 30a) e sob o ponto de aplicação da carga (figura 30b).



Figura 29 – Rotura por flexão com esmagamento do betão.



a



b

Figura 30 – Rótulas plásticas: a) No encastramento; b) Sob ponto aplicação da carga.

4- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

4.1 - Vigas Simplesmente Apoiadas

Neste estudo, os valores de carga de rotura e de esforço transversal resistente, foram determinados de uma forma analítica de acordo com EN 1992-1-1 (2004), utilizando as propriedades dos materiais, determinadas a partir dos respectivos ensaios de caracterização, enquanto os valores médios experimentais foram registados pelas medições realizadas durante os ensaios.

Analisando os valores apresentados na tabela 10, verifica-se que os resultados previstos de uma forma analítica se aproximam bastante dos obtidos experimentalmente. De notar que, na generalidade, a carga experimental é superior à determinada pela via analítica.

Verifica-se também um aumento da carga de rotura por flexão de tipologia para tipologia, que se deve à percentagem de armadura longitudinal. Entre as tipologias 4 e 3, que supostamente deveriam ter igual carga de rotura à flexão, verifica-se que a tipologia 4 apresenta um valor experimental superior, devendo-se tal ao menor espaçamento da armadura transversal, que confere, “per si”, um maior grau de confinamento.

Tabela 10 – Comparação entre cargas de rotura.

Tipologia	$F_{teo.}$ (kN)	$F_{exp.}$ (kN)	$F_{exp.} / F_{teo.}$ (%)
1	23.03	24.80	107.69
2	26.52	29.98	113.05
3	38.38	43.00	112.04
4	38.38	44.00	114.64

A única tipologia a apresentar roturas por corte é a tipologia 3 (tabela 11). No caso de roturas por corte, salienta-se que os valores experimentais são substancialmente superiores aos previstos pelo cálculo analítico o que poderá resultar do facto dos modelos ao corte, previstos na EN 1992-1-1 (2004), serem bastante conservativos.

De um modo geral verifica-se que quanto maior for a percentagem de

armadura longitudinal, maior a probabilidade de se obterem roturas por corte. Assim sendo, a única diferença, entre as tipologias 3 e 4, corresponde à distribuição da armadura transversal. De facto, na tipologia 4 a armadura de esforço transversal apresenta um menor espaçamento. Este facto leva a que as roturas por corte sejam, por si, mais difíceis de se obterem.

Contudo, mesmo para a tipologia 3, existem situações de rotura por corte e outras de rotura por flexão, com esmagamento do betão. Podemos referir que se trata, por isso, de uma tipologia que se encontra na zona de transição entre estes dois tipos de rotura.

Na realidade, existem outros factores, tais como a má amarração da armadura transversal (Pires *et al.*, 2008), que têm como consequência um menor confinamento do betão, a não homogeneidade das características do betão, o recobrimento real da armadura longitudinal, entre outros, que podem interferir no tipo de rotura obtido.

Tabela 11 – Comparação entre esforços transversos resistentes.

Tipologia	$V_{Rd,teo.}$ (kN)	$V_{Rd,exp.}$ (kN)	$V_{Rd,exp.} / V_{Rd,teo.}$ (%)
1	27.45	(*)	(*)
2	26.80	(*)	(*)
3	25.07	40.63	162.07
4	33.43	(*)	(*)

(*) A tipologia não apresenta casos de rotura por corte.

Pode-se, deste modo, concluir que para um mesmo espaçamento de armadura transversal, baixas percentagens de armadura longitudinal correspondem a modos de rotura por flexão, com rotura do aço, médias percentagens de armadura longitudinal correspondem a modos de rotura por flexão, com esmagamento do betão, e elevadas percentagens de armadura longitudinal correspondem a modos de rotura por corte. Verifica-se, também, que para uma mesma percentagem de armadura longitudinal, a pequenos espaçamentos de armaduras transversais correspondem modos de rotura por flexão e, a elevados

espaçamentos, modos de rotura por corte (Matos *et al.*, 2009).

4.2 - Vigas Parcialmente Encastradas

Neste estudo, os valores teóricos foram determinados de uma forma analítica, de acordo com EN 1992-1-1 (2004) e com as equações de equilíbrio da estática, utilizando as propriedades dos materiais determinadas a partir dos respectivos ensaios de caracterização, enquanto os valores médios experimentais foram registados pelas medições realizadas durante os ensaios.

De acordo com tabela 12, verifica-se que a tipologia 2 apresenta uma carga de rotura superior à da tipologia 1, o que se deve ao aumento da altura útil. A tipologia 3 apresenta um valor semelhante ao da tipologia 1, para a carga última, pois a diferença existente, espaçamento da armadura transversal, pouca influência tem no parâmetro em questão, sendo o modo de rotura por flexão. A tipologia 4 encontra-se associada a uma maior carga de rotura em relação à tipologia 1, devendo-se tal à maior percentagem de armadura longitudinal. A situação inversa ocorre com a tipologia 5.

Tabela 12 – Comparação entre cargas de rotura.

Tipologia	$F_{teo.}$ (kN)	$F_{exp.}$ (kN)	$F_{exp.} / F_{teo.}$ (%)
1	15.76	29.39	186.49
2	17.61	30.84	175.13
3	15.76	29.89	189.66
4	16.16	35.79	221.47
5	10.11	20.99	207.62

Verifica-se, da análise da tabela 12, que as cargas de rotura obtidas experimentalmente são superiores às calculadas analiticamente, à semelhança do que aconteceu com as vigas simplesmente apoiadas. Contudo, o rácio, no caso das vigas hiperstáticas é consideravelmente maior. Tal facto deve-se sobretudo à maior robustez, no caso das vigas parcialmente encastradas, e, ao facto de se utilizarem leis muito conservativas para o cálculo da

carga de rotura, nomeadamente, o método das rótulas plásticas.

A tabela 13 indica os valores dos momentos resistentes no encastramento para as tipologias em análise. Verifica-se que as tipologias 2 e 3 apresentam valores próximos dos obtidos para a tipologia 1. As diferenças existentes poderão estar relacionadas com a materialização do encastramento: quanto mais rígido este for, mais o apoio se aproxima de um encastramento perfeito e, consequentemente, maior o valor do momento experimental no encastramento. A tipologia 4, apresenta um valor de momento experimental superior ao da tipologia 1, consequência da maior percentagem de armadura longitudinal, enquanto a situação inversa ocorre para a tipologia 5.

No caso dos momentos flectores resistentes, na zona de encastramento, verifica-se que os valores teóricos e experimentais se encontram mais próximos. Tal facto poderá dever-se a que, para cálculo analítico do momento resistente na zona de encastramento, não ser necessário recorrer a métodos de análise plástica, mais conservativos.

Verifica-se que os valores teóricos de esforço transversal resistente são bastante superiores àqueles obtidos durante o ensaio o que afasta qualquer tipo de rotura por corte. Contudo, os valores são muito semelhantes entre si, de acordo com a tabela 13, sendo superiores nas tipologias 2 e 5, dado o aumento da altura útil. De notar que o espaçamento entre armadura transversal, neste caso, é muito baixo.

Tabela 13 – Comparação entre momentos flectores resistentes.

Tipologia	$M_{Rd,teo.}$ (kN)	$M_{Rd,exp.}$ (kN)	$M_{Rd,exp.} /$ $M_{Rd,teo.}$	$V_{Rd,teo.}$ (kN) (*)
1	5.29	6.90	1.3044	45.97
2	5.83	6.67	1.1441	49.74
3	5.29	6.47	1.2231	45.95
4	6.06	7.86	1.2970	45.97
5	3.79	4.94	1.3034	46.35

(*) Valor de referência.

5- CONCLUSÕES

No presente artigo, apresentam-se os principais resultados provenientes da análise experimental de um conjunto de vigas ensaiadas até à rotura. Deste conjunto fazem parte os ensaios de 36 vigas simplesmente apoiadas e 32 vigas parcialmente encastradas. Procedeu-se a uma avaliação dos respectivos comportamentos, por tipologias de armadura e recobrimento previamente seleccionadas, e realizou-se uma comparação dos resultados obtidos por via experimental com aqueles obtidos por via analítica segundo a EN 1992-1-1 (2004). Esta análise de sensibilidade permitiu aferir sobre a relação existente entre o comportamento global até à rotura das tipologias em causa. Assim sendo, podemos concluir, de todos os pontos abordados neste artigo, o seguinte:

1. Verifica-se que, quanto maior o recobrimento, menor a altura útil da viga e, consequentemente, menor a sua resistência. Por sua vez, quanto maior a percentagem de armadura longitudinal, maior a resistência da respectiva viga;

2. Nos modos de rotura por flexão, o espaçamento entre armadura transversal tem pouca influência;

3. Os modos de rotura por corte, sem qualquer aviso, são mais susceptíveis de aparecer com o aumento da percentagem de armadura longitudinal e do espaçamento da armadura transversal;

4. Existem situações limite em que potenciais erros de obra, como por exemplo a má amarração da armadura transversal que confere um mau confinamento do betão, podem causar roturas por corte (Pires *et al.*, 2008);

5. A rotura por flexão com extensão excessiva na armadura ocorre em estruturas com menor grau de hiperstaticidade, com menor espaçamento entre armadura transversal e, essencialmente, quando a armadura longitudinal é composta por varões de pequeno diâmetro;

6. Vigas simplesmente apoiadas entram em rotura com a formação da primeira rótula, enquanto a existência de um grau de encastramento, por mais pequeno que seja, confere sempre a possibilidade de formação de duas rótulas e, consequentemente, está associado a uma maior robustez;

7. O grau de encastramento das vigas parcialmente encastradas tem uma influência preponderante em todo seu comportamento até à rotura. Na realidade, um encastramento perfeito é muito difícil de se materializar;

8. Outro factor, preponderante no comportamento até à rotura de vigas de betão armado, corresponde à capacidade de redistribuição dos esforços das rótulas plásticas, que, por sua vez, depende da percentagem de armadura longitudinal e do espaçamento da armadura transversal;

9. Verifica-se que na situação das vigas simplesmente apoiadas, os resultados obtidos via analítica aproximaram-se daqueles obtidos via experimental, o que confirma os modelos presentes no EN 1992-1-1 (2004). Contudo, estes modelos tornam-se conservativos no caso de roturas por corte e na análise de estruturas hiperstáticas.

10. A análise de um elevado número de vigas com igual tipologia permitiu concluir acerca da variabilidade de alguns parâmetros. Destes, é de realçar as características do betão, que dependem das condições em que se efectuou a betonagem, a espessura das vigas, que depende das cofragens realizadas, e o recobrimento das armaduras, que depende dos espaçadores utilizados e da fixação da armadura;

11. De realçar a dispersão de resultados verificada entre vigas da mesma tipologia e com idêntica armadura. Esta dispersão é maior no caso de roturas por corte, onde a quantidade de parâmetros que pode influir no respectivo modo de rotura é muito superior;

No futuro próximo será necessário efectuar uma análise das respectivas tipologias, utilizando um programa de análise não linear de estruturas, de modo a aferir os resultados obtidos. Pretende-se recorrer a uma análise probabilística considerando a variabilidade dos parâmetros mais influentes. Contudo, e para tal, existe a necessidade de se definir, devidamente, as leis de distribuição que caracterizam esses parâmetros.

6- AGRADECIMENTOS

Expressa-se um agradecimento especial ao LEST – Laboratório de Estruturas pelo apoio na realização dos ensaios apresentados neste artigo, bem como, à FCT - Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio concedido na investigação realizada.

7- REFERÊNCIAS

- EN 1992-1-1, Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão armado – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Abril de 2004.
- Matos, J.C., Valente, I. e Cruz, P. 2010. Avaliação de incertezas no comportamento até à rotura de vigas de betão armado, ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes, ISBN 978-989-20-1559-0, Lisboa, 1 – 3 Julho 2009, p. 5-12.
- NP ENV 10002-1:2001 – Ensaio de Tracção de Materiais Metálicos, 2001.
- NP EN 12390-3 :2003 – Ensaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, 2003.
- RILEM TC50-FMC: Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams, Materials and Structures, Vol. 18, Nº 106, Jul-Aug 1985, pp 285-290.
- Pires, S., Fernandes, F., Lopes, S. E Carmo, R. 2008. Ensaios de vigas de betão armado. Roturas típicas, BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural, ISBN 978-989-95961-0-8, Guimarães, 5 – 7 Novembro 2008, p. 185-186.