

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA DUCTILIDADE À FLEXÃO DE VIGAS DE BETÃO DE AGREGADOS LEVES

Hugo A. S. Pinto^{1*}, Luís F. A. Bernardo² e Miguel C. S. Nepomuceno²

1: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
C-made: Centro de Materiais e Tecnologias Construtivas
Universidade da Beira Interior,
6201-001 Covilhã, Portugal
e-mail: pinto.ha@gmail.com, web: <http://www.ubi.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
C-made: Centro de Materiais e Tecnologias Construtivas
Universidade da Beira Interior,
6201-001 Covilhã, Portugal
e-mail: luis.bernardo@ubi.pt, mcsn@ubi.pt, web: <http://www.ubi.pt>

Palavras-chave: vigas, betão armado, betão de agregados leves, flexão, ductilidade

Resumo. *O presente artigo descreve um estudo experimental que teve por objetivo avaliar a ductilidade à flexão de vigas de betão armado produzidas com betão de agregados leves de argila expandida com resistências à compressão entre os 20 e os 60 MPa e massas volúmicas secas de 1650 a 1950 kg/m³. No total foram ensaiadas até à rotura dezanove vigas de 2,6 metros de comprimento e secção transversal retangular média de 0,15 m x 0,30 m, com diferentes taxas de armadura longitudinal de tração. As vigas foram simplesmente apoiadas perto das extremidades e sujeitas a duas cargas concentradas idênticas, simetricamente distribuídas a terços de vão. A zona central das vigas (entre as cargas aplicadas) encontrava-se sob flexão pura e, para prevenir a rotura por corte na zona perto dos apoios, foram colocados estribos em quantidade suficiente, deixando livre a zona central. A ductilidade foi avaliada através da definição de índices de ductilidade. As variáveis principais neste estudo foram a resistência à compressão do betão de agregados leves e a taxa de armadura longitudinal de tração. Neste estudo é apresentada uma análise comparativa entre as vigas produzidas em termos de ductilidade à flexão. O estudo evidenciou que, de entre as duas variáveis analisadas, aquela que mostrou maior influência na ductilidade foi a taxa de armadura longitudinal de tração. Foi também possível observar uma ordem de grandeza para o limite máximo de taxa de armadura longitudinal compatível com um comportamento dúctil à flexão das vigas analisadas.*

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o betão estrutural com agregados leves teve uma evolução notável. Este material apresenta vantagens quando comparado com o betão corrente, tais como melhoria da produtividade, melhoria ambiental, melhoria no ambiente térmico e acústico, maior resistência ao fogo, maior durabilidade, alta resistência à compressão e menor densidade. Estas vantagens têm conduzido a um incremento de utilização destes betões em estruturas *offshore* e marítimas [1], lajes e vigas em edifícios altos, tabuleiros de pontes em estruturas de grandes vãos [2], reabilitação de pavimentos, reforço de edifícios [3], elementos pré-fabricados [4] e elementos compósitos [5].

Hoje em dia, é conhecido que as estruturas devem não só proporcionar uma resistência adequada, mas também assegurar a necessária ductilidade em condições de sobrecarga. É conhecido que o betão se torna mais frágil e menos deformável com o aumento da resistência à compressão. Por isso a ductilidade é uma propriedade importante a ter em conta sempre que se pretende aumentar a resistência do betão.

Os estudos sobre a flexão ainda não esclarecem inequivocamente como a resistência do betão afeta a ductilidade. Alguns autores [9, 13] observaram uma perda de ductilidade nas vigas de betão armado com o aumento da resistência do betão à compressão. Outros estudos [6, 7, 11, 12] observaram o contrário. No que diz respeito ao efeito da taxa de armadura longitudinal de tração, todos os estudos acima mencionados concordam que a ductilidade diminui à medida que a referida taxa aumenta em proporção. No entanto, está ainda por definir qual o intervalo de taxa de armadura compatível com um comportamento dúctil à flexão em vigas de betão de agregados leves.

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental teve como objetivo principal ensaiar até à rotura 19 vigas de betão estrutural de agregados leves. As vigas tinham um comprimento total de 2,60 metros e uma secção transversal retangular de 15 cm x 30 cm. As vigas, simplesmente apoiadas, foram sujeitas a um carregamento simétrico constituído por duas forças concentradas iguais e colocadas aproximadamente a terços de vão, de forma a permitir a obtenção de uma região central suficientemente extensa e submetida à flexão pura.

A Figura 1 representa esquematicamente um corte longitudinal e transversal das vigas ensaiadas, mostrando as dimensões médias, pormenorização tipo das armaduras, sistema de apoio utilizado, localização dos pontos de aplicação da carga e disposição de armadura longitudinal de tração.

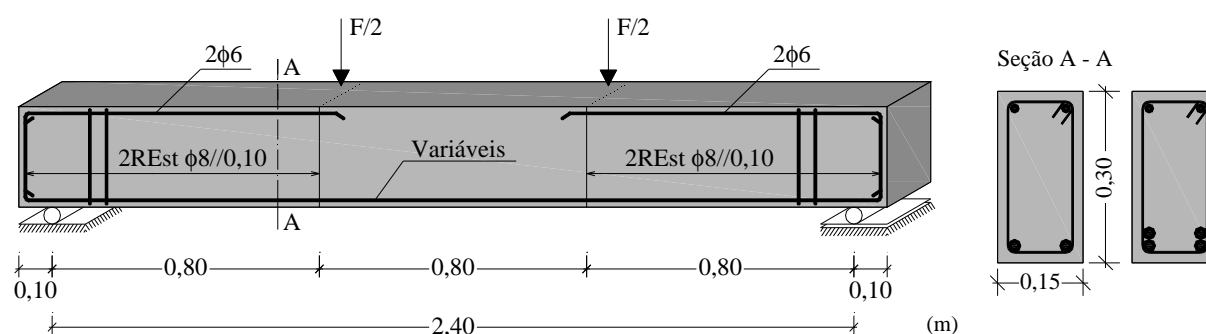


Figura 1. Corte longitudinal e transversal das vigas ensaiadas.

Com o objetivo de garantir a rotura à flexão foi prevista uma armadura transversal suficientemente densa exteriormente à zona central, constituída por estribos pouco espaçados, de modo a potenciar uma rotura por flexão dentro da zona de flexão pura. Na região central, entre os pontos de aplicação das cargas exteriores, não foi prevista nenhuma armadura de esforço transversal com o objetivo de, na região de rotura teoricamente em flexão pura, o betão se encontrar não confinado. A armadura longitudinal de tração foi composta por varões nervurados de aço laminado a quente (S400 NR), com diâmetros comerciais que variam entre os 6 mm e 20 mm.

A Tabela 1 resume as características geométricas, físicas e mecânicas de cada viga, nomeadamente: a altura útil (d), a resistência média à compressão obtida para o betão (f_{ic}), a massa volúmica seca do betão (δ), as soluções adotadas para as armaduras, a área (A_s) e a taxa de armadura longitudinal (ρ). As vigas foram divididas em três séries (S1, S2 e S3) em função da gama obtida para a resistência do betão.

Tabela 1. Caracterização das vigas ensaiadas.

Série	Vigas	f_{ic} MPa	δ kg/m ³	Soluções	A_s cm ²	d cm	ρ %
S1	S1-VBL1	23,5	1659	2 ϕ 6	0,56	27,7	0,13
	S1-VBL2	22,8	1685	2 ϕ 8	1,01	27,6	0,24
	S1-VBL3	22,0	1667	2 ϕ 10	1,58	27,5	0,38
	S1-VBL4	22,4	1651	2 ϕ 12	2,26	27,4	0,55
	S1-VBL5	28,5	1659	2 ϕ 16	4,02	27,2	0,99
S2	S2-VBL1	45,1	1802	2 ϕ 6	0,56	27,7	0,13
	S2-VBL2	42,1	1807	2 ϕ 8	1,01	27,6	0,24
	S2-VBL3	47,1	1809	2 ϕ 10	1,58	27,5	0,38
	S2-VBL4	49,2	1827	2 ϕ 12	2,26	27,4	0,55
	S2-VBL5	43,9	1788	2 ϕ 16	4,02	27,2	0,99
	S2-VBL6	47,0	1791	2 ϕ 20	6,28	27,0	1,55
	S2-VBL7	43,0	1790	4 ϕ 16	8,04	26,4	2,03
S3	S3-VBL1	52,1	1867	2 ϕ 6	0,56	27,7	0,13
	S3-VBL2	51,2	1879	2 ϕ 10	1,58	27,5	0,38
	S3-VBL3	52,4	1869	2 ϕ 12	2,26	27,4	0,55
	S3-VBL4	55,3	1910	2 ϕ 16	4,02	27,2	0,99
	S3-VBL5	53,4	1877	2 ϕ 20	6,28	27,0	1,55
	S3-VBL6	60,4	1953	4 ϕ 16	8,04	26,4	2,03
	S3-VBL7	51,6	1867	2 ϕ 16 + 2 ϕ 20	10,30	25,5	2,69

A Tabela 2 resume as dosagens usadas para a produção de 1 m³ de betão de agregados leves.

Tabela 2. Dosagens obtidas para a produção de 1 m³ de betão.

Componentes		Composição dos betões (dosagem por 1 m ³ de betão)		
		Série S1	Série S2	Série S3
Cimento Portland (kg)	CEM II/B-L32,5N	335	---	---
	CEM I 42,5R	---	445	494
Adições minerais (kg)	Fíler calcário	---	---	35
	Microsílica	---	---	43
Superplastificante (l)		1,34	5,34	9,88
Água (l)		174	146	153
Areia natural (Areia 0/5) (kg)		841	756	775
Agregado grosso leve (LECA 4/12) (kg)		463	501	426
Razão água/(materiais cimentíceos): W/B (massa)		0,52	0,33	0,29
Massa volúmica do betão fresco (kg/m ³)		1814	1853	1935

No processo de produção de betão recorreu-se a uma misturadora de eixo vertical com capacidade nominal de 75 litros. Para cada uma das vigas betonadas foram moldados provetes cúbicos de 150 mm de aresta, curados nas mesmas condições que as respectivas vigas. As vigas foram curadas em ambiente exterior não controlado, mas com a preocupação de manter a superfície do betão húmida durante os primeiros 7 dias e protegidas por uma tela plástica para evitar a perda prematura de água. Aos 28 dias de idade foram realizados ensaios para se obter o valor médio da resistência à compressão dos betões de agregados leves.

Para conhecer as tensões e extensões de cedência das armaduras foram executados ensaios à tração de provetes de aço. A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios, a saber: a tensão média de cedência (f_y), as primeiras extensões de cedência das armaduras (ϵ_y) e a tensão correspondente à força máxima (f_t). O módulo de elasticidade do aço (E_s) foi assumido como sendo igual ao valor regulamentar para armaduras ordinárias, ou seja, 200 GPa.

Tabela 3. Resultados dos ensaios à tração dos provetes de aço.

Diâmetro mm	f_y MPa	ϵ_y 10^{-6}	f_t MPa
φ6	503	2515	536
φ8	550	2750	670
φ10	565	2825	684
φ12	534	2672	642
φ16	575	2876	679
φ20	572	2860	668

A Figura 2 ilustra a viga na posição de ensaio, incluindo a localização e identificação dos dispositivos de medição externos. Com a finalidade de medir as extensões de compressão e de tração sofridas pela viga ao longo da sua altura, foi prevista uma rede de pontos externos entre as cargas aplicadas. Em cada ponto foi colada uma pastilha em aço ("Demec") e, para garantia de um afastamento base de 10 cm, as pastilhas foram colocadas com a ajuda de uma base padronizada. Extensómetros de resistência foram fixados nas armaduras longitudinais de tração a $\frac{1}{2}$ vão da viga para medir a evolução das extensões ao longo dos ensaios. O nível de carga aplicada foi medido usando uma célula de carga. Todas as leituras dos instrumentos de medição instalados nas vigas foram registados através de um aparelho "Data Logge" para aquisição de dados. Os ensaios das vigas foram realizados com controlo de deslocamento.

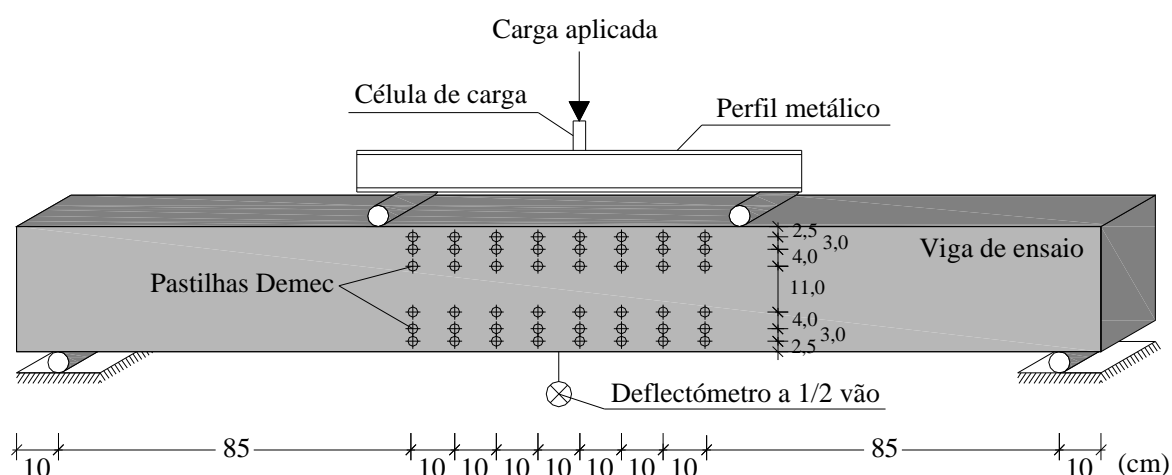


Figura 2. Esquema do equipamento de ensaio.

A Figura 3 mostra uma viga colocada no pórtico de ensaio e pronta a ser ensaiada. A Figura 4, a título exemplificativo, mostra a rotura da viga por esmagamento do betão (entre os pontos de aplicação de carga).



Figura 3. Viga no pórtico de ensaio.



Figura 4. Rotura por esmagamento do betão.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As Figuras 5 a 7 apresentam os gráficos carga total aplicada (P) versus flecha a $\frac{1}{2}$ vão (δ) obtidos experimentalmente para cada viga ensaiada. Cada figura inclui as curvas obtidas para todas as vigas pertencentes a uma mesma série.

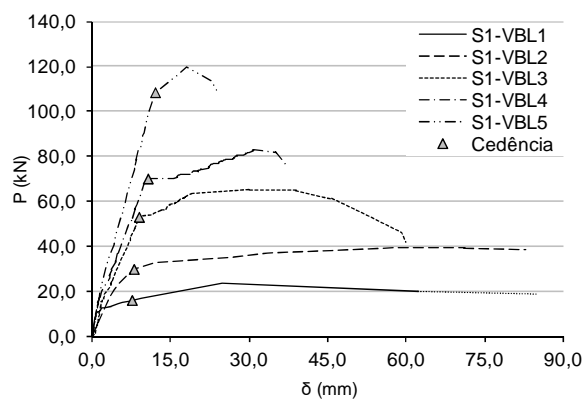


Figura 5. Curvas P- δ (Série S1).

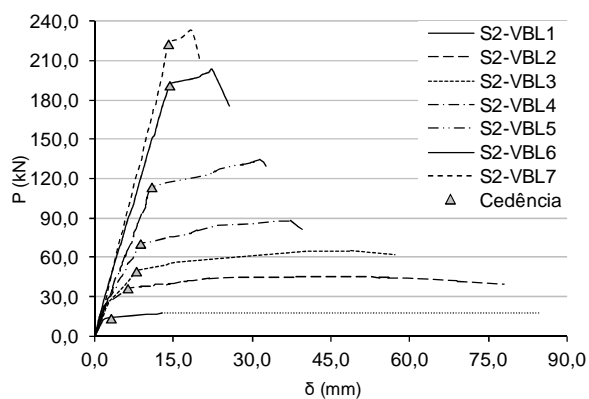


Figura 6. Curvas P- δ (Série S2).

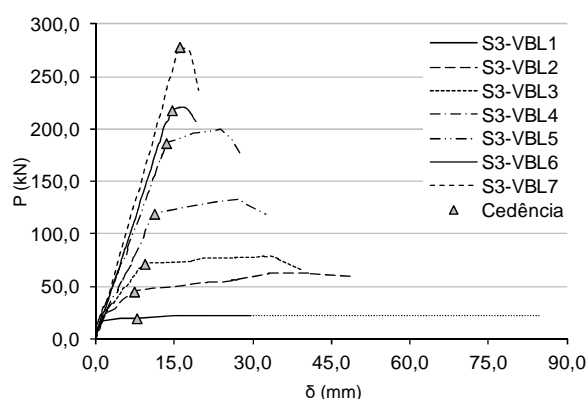


Figura 7. Curvas P- δ (Série S3).

Para as vigas com as menores taxas de armadura, a rotura deu-se em geral por insuficiência de armadura. Em tais vigas, não foi possível realizar os registos até à rotura das armaduras. Apesar de algumas exceções, a tendência geral é a de que, para uma dada gama de betões, a capacidade de deformação da viga com as armaduras em cedência vai diminuindo com o aumento da quantidade de armadura tracionada. A tendência acima relatada não só era prevista como tem sido relatada por outros estudos, incluindo com vigas de betões de agregados leves [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

As Figuras 8 a 10 apresentam os gráficos momento (M) versus curvatura ($1/r$) obtidos experimentalmente para cada viga ensaiada. Os momentos são valores estaticamente relacionados com a carga aplicada na viga durante o ensaio. As curvaturas foram determinadas a partir da reta de regressão linear dos pontos experimentais correspondentes às extensões experimentais medidas na zona de rotura com o auxílio das pastinhas 'Demec'. Uma tendência claramente observada nas figuras momento versus curvatura é a sua forma quase bilinear. Esta observação concorda com estudos anteriores com vigas de betão normal [11, 12].

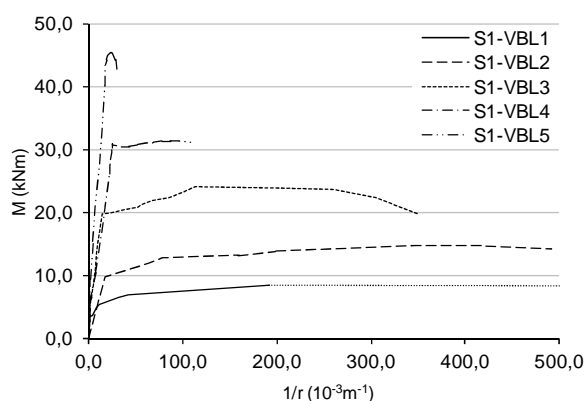


Figura 8. Curvas M- $1/r$ (Série S1).

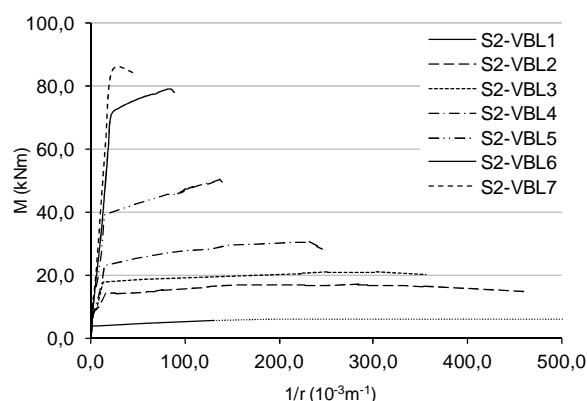


Figura 9. Curvas M- $1/r$ (Série S2).

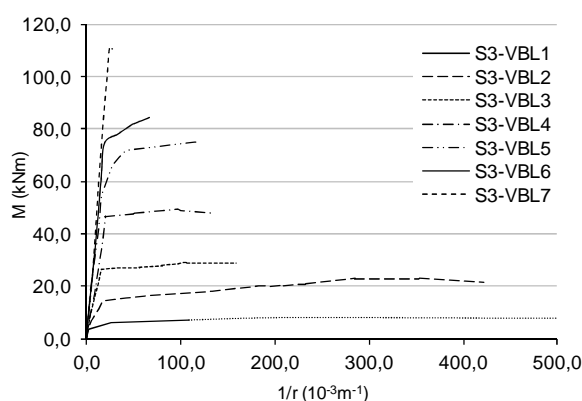


Figura 10. Curvas M-1/r (Série S3).

A Tabela 4 apresenta os valores experimentais obtidos para a carga de cedência (P_y), carga última (resistente) (P_r), momento de cedência (M_y) e momento último (resistente) (M_r).

Tabela 4. Pontos principais das curvas.

Série	Vigas	P_y kN	P_r kN	M_y kNm	M_r kNm
S1	S1-VBL1	15,9	≈23,8	6,3	≈8,5
	S1-VBL2	29,7	39,3	11,9	14,7
	S1-VBL3	52,9	64,2	21,1	24,0
	S1-VBL4	70,0	82,9	30,8	31,4
	S1-VBL5	108,4	119,5	43,6	45,4
S2	S2-VBL1	14,1	≈17,3	5,6	≈6,2
	S2-VBL2	37,0	45,5	14,8	16,9
	S2-VBL3	50,0	64,9	18,6	21,1
	S2-VBL4	71,1	87,7	25,1	30,6
	S2-VBL5	114,1	134,4	42,5	50,3
	S2-VBL6	191,5	202,7	73,3	79,1
	S2-VBL7	223,0	232,3	84,9	22,9
S3	S3-VBL1	20,2	≈22,5	7,4	≈8,2
	S3-VBL2	45,7	62,4	16,4	23,0
	S3-VBL3	72,1	79,0	26,8	29,1
	S3-VBL4	119,6	132,7	47,8	49,7
	S3-VBL5	186,9	200,1	72,1	75,1
	S3-VBL6	218,2	220,6	78,0	84,2
	S3-VBL7	278,3	279,1	110,6	111,6

A carga de cedência (P_y) foi calculada com base nos valores experimentais das extensões obtidos nas armaduras longitudinais de tração. Estes valores foram comparados com os valores médios de cedência obtidos diretamente a partir dos ensaios de tração dos provetes de armaduras utilizadas nas vigas (Tabela 3). O momento de cedência (M_y) foi obtido estaticamente a partir do valor experimental conhecido P_y .

4. ANÁLISE DE DUCTILIDADE

4.1. Índices de ductilidade

A ductilidade pode ser calculada tendo por base o estado de deformação inelástica da viga, podendo este ser computado através de índices de ductilidade. Um índice de ductilidade de deformação pode

ser definido da seguinte forma:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

O parâmetro Δ_u representa a deformação da viga para a carga de rotura (carga última) e Δ_y a deformação da viga para a carga que provoca a cedência das armaduras tracionadas (carga de cedência).

Neste trabalho foram utilizados dois índices de ductilidade diferentes: μ_x e μ_δ (Equações (2) e (3)). O primeiro índice, designado por índice de ductilidade de curvatura (μ_x), é obtido relacionando a curvatura na zona de $\frac{1}{2}$ vão da viga correspondente ao momento último $(1/r)_u$ com a mesma curvatura correspondente ao momento de cedência da armadura longitudinal de tração $(1/r)_y$.

$$\mu_x = \frac{(1/r)_u}{(1/r)_y} \quad (2)$$

O outro índice, designado por índice de ductilidade de flecha (μ_δ), é obtido relacionando a flecha a meio vão da viga correspondente à carga última (δ_u) com a mesma flecha correspondente à carga de cedência da armadura longitudinal de tração (δ_y).

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3)$$

Os dois índices definidos acima também foram utilizados em diversos estudos anteriores [7, 9, 11, 12, 13, 14]. O ponto correspondente à carga última nas curvas experimentais foi definido tendo por base o seguinte critério: a curvatura última e a flecha última são consideradas como sendo aquela a que corresponde um momento ou força igual a 80% do valor máximo obtido na curva experimental, ao longo do ramo descendente desta. Se a curva experimental não apresentar um ramo descendente, o critério escolhido foi o de fazer corresponder o ponto último do diagrama de comportamento ao ponto de interseção entre a parte final da curva com uma linha horizontal que passa no ponto onde as armaduras entram em cedência. Os critérios anteriormente referidos são ilustrados na Figura 11 e foram também utilizados em estudos anteriores [11, 12].

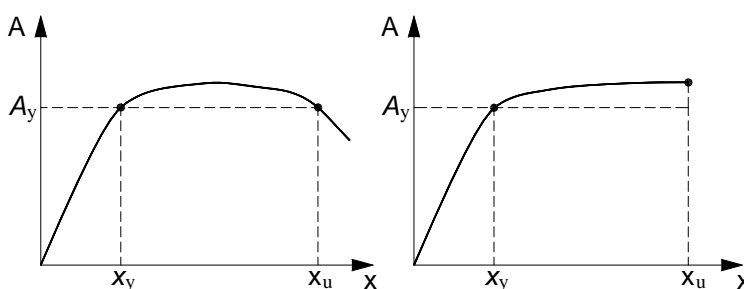


Figura 11. Definição dos parâmetros últimos [11, 12].

A Tabela 5 apresenta os valores experimentais dos parâmetros necessários ao cálculo dos índices de ductilidade para as vigas ensaiadas bem como os valores obtidos para os referidos índices: flecha de cedência (δ_y), flecha última (δ_u), curvatura de cedência $((1/r)_y)$, curvatura última $((1/r)_u)$, índice de ductilidade de flecha (μ_δ) e índice de ductilidade de curvatura (μ_x). A primeira viga de cada série não está incluída na Tabela 5 porque a última parte da sua curva experimental não foi considerada fiável pelas razões referidas anteriormente (Secção 3). A flecha de cedência (δ_y) é calculada a partir de uma interpolação linear dos valores experimentais da carga e da flecha, conhecendo à partida a

carga de cedência (P_y) para cada viga. A curvatura de cedência ($(1/r)_y$) é calculada por meio de uma interpolação linear dos valores experimentais obtidos para os momentos e curvaturas, conhecendo o momento de cedência (M_y) para cada viga. A Tabela 5 apresenta também, para cada viga, o valor médio de resistência à compressão do betão. Tal informação será relevante para a Secção 4.3.

Tabela 5. Valores experimentais dos índices de ductilidade.

Série	Vigas	f_{ic} MPa	δ_y mm	δ_u mm	$(1/r)_y$ $10^{-3} m^{-1}$	$(1/r)_u$ $10^{-3} m^{-1}$	μ_δ	μ_x
S1	S1-VBL2	23,9	8,0	82,9	64,0	491,5	10,4	7,7
	S1-VBL3		9,0	53,4	56,2	327,2	5,9	5,8
	S1-VBL4		10,7	37,2	25,6	107,8	3,5	4,2
	S1-VBL5		12,1	24,0	17,7	28,8	2,0	1,6
S2	S2-VBL2	45,4	6,3	78,0	59,6	463,6	12,4	7,8
	S2-VBL3		7,9	57,1	54,8	355,5	7,2	6,5
	S2-VBL4		8,7	39,4	46,4	245,4	4,5	5,3
	S2-VBL5		10,9	32,9	48,1	139,9	3,0	2,9
	S2-VBL6		14,3	23,7	31,3	88,6	1,7	2,8
	S2-VBL7		14,0	19,1	84,9	48,4	1,4	2,1
	S3-VBL2		7,4	49,0	67,5	420,4	6,7	6,2
S3	S3-VBL3	54,1	9,4	36,7	31,9	158,1	3,9	5,0
	S3-VBL4		11,2	32,1	49,9	134,1	2,9	2,7
	S3-VBL5		13,5	26,3	41,8	115,0	2,0	2,8
	S3-VBL6		14,6	17,6	33,4	66,2	1,2	2,0
	S3-VBL7		16,0	16,4	23,2	26,2	1,0	1,1

4.2. Influência da resistência do betão

A fim de estudar a influência da resistência do betão à compressão na ductilidade, foram agrupadas as vigas com iguais ou semelhantes taxas de armaduras longitudinais de tração (ρ). A Tabela 6 agrupa as vigas em função das taxas de armadura e apresenta para cada grupo o valor médio da taxa de armadura longitudinal de tração (ρ_m). Apenas foram considerados os grupos com maior número de vigas (mínimo 3 vigas).

Tabela 6. Agrupamento das vigas com taxas de armaduras semelhantes.

Grupo	Vigas	ρ_m %	f_{ic} MPa	μ_δ	μ_x
I	S1-VBL3	0,38	22,0	5,94	5,82
	S2-VBL3		47,1	7,21	6,49
	S3-VBL3		51,2	6,66	6,23
II	S1-VBL4	0,55	22,4	3,49	4,21
	S2-VBL4		49,2	4,52	5,29
	S3-VBL4		52,4	3,92	4,96
III	S1-VBL5	0,99	28,5	1,99	1,62
	S2-VBL5		43,9	3,03	2,91
	S3-VBL5		55,3	2,86	2,69

Os gráficos das Figuras 12 e 13 ilustram a evolução dos índices de ductilidade de flecha (μ_δ) e curvatura (μ_x) com as resistências à compressão do betão (f_{ic}). Os gráficos também incluem uma linha de tendência (calculada em regressão linear) para realçar a evolução dos índices de ductilidade em estudo. A análise das Figuras 12 e 13 mostra que, para uma taxa de armadura longitudinal de tração aproximadamente constante, os índices de ductilidade das vigas tendem a aumentar ligeiramente com a resistência do betão.

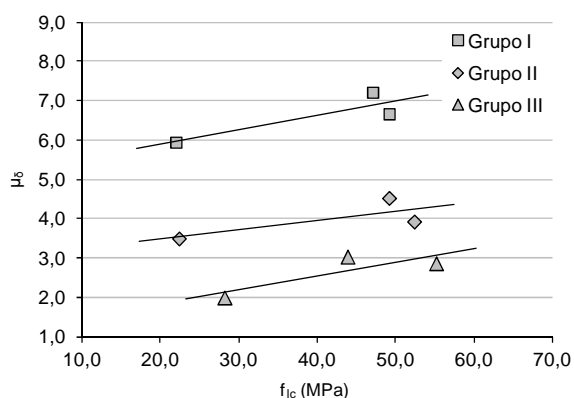


Figura 12. Influência de f_{1c} em μ_{δ} .

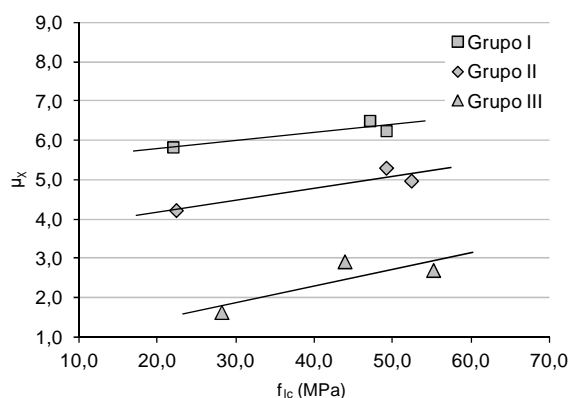


Figura 13. Influência de f_{1c} em μ_{χ} .

A tendência anteriormente observada corrobora com o observado por Bernardo e Lopes [11, 12] para vigas de betão de densidade normal. A tendência observada nesta secção tem uma explicação física. Para taxas de armaduras aproximadamente constantes, a profundidade da linha neutra na rotura de secções de betão simplesmente armada diminui com o aumento da resistência do betão, justificando assim o incremento ligeiro de ductilidade observado.

4.3. Influência da taxa de armadura longitudinal nos índices de ductilidade

Para estudar a influência da taxa de armadura longitudinal na ductilidade, é necessário agrupar as vigas com resistência à compressão do betão iguais ou semelhantes. Tal foi já realizado na Tabela 5. Analisando os valores obtidos para o índice de ductilidade de flecha, a Tabela 5 mostra que, em cada grupo de vigas, o índice de ductilidade decresce em geral com o aumento da taxa de armadura longitudinal. Este comportamento pode ser também explicado fisicamente. Para a mesma resistência do betão, o acréscimo da taxa de armadura longitudinal de tração faz aumentar a profundidade da linha neutra na rotura, originando assim uma tendência para uma rotura menos dúctil.

A tendência observada corrobora com o observado por Bernardo e Lopes [11, 12] em vigas de betão de densidade normal, usando o mesmo critério para definir o ponto último das curvas experimentais. Estes resultados também confirmam estudos de outros autores [6, 7, 9, 13] com outros critérios para definir o ponto último das curvas experimentais. Nas Figuras 14 e 15 apresenta-se graficamente a evolução dos índices de ductilidade em função da taxa de armadura longitudinal (ρ). Os gráficos da Figuras 14 e 15 também incluem uma curva exponencial que se ajusta perfeitamente à tendência dos resultados. Como vimos na secção anterior, a influência da resistência da resistência à compressão do betão na ductilidade é pequena. Por isso, os gráficos das Figuras 14 e 15 incluem os resultados obtidos para todos os agrupamentos, independentemente da resistência do betão. Através dos gráficos das Figuras 14 e 15 confirma-se a redução do índice de ductilidade de flecha com o incremento da taxa da armadura longitudinal.

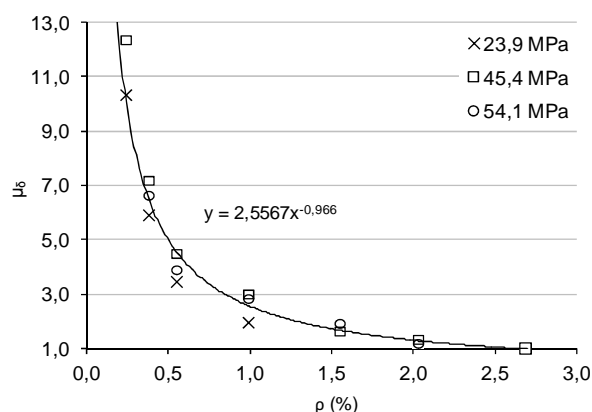


Figura 14. Influência de ρ em μ_{δ} .

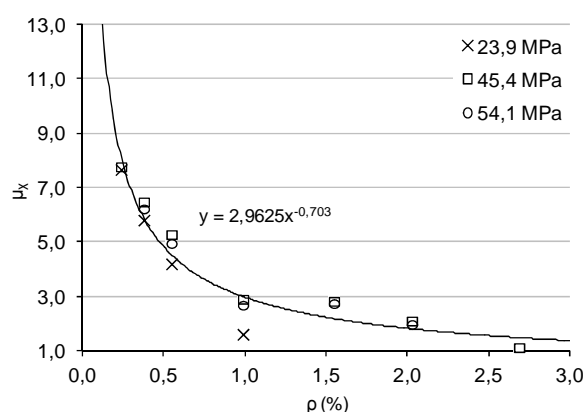


Figura 15. Influência de ρ em μ_{κ} .

O gráfico da Figura 14 mostra também uma grande redução dos índices de ductilidade de flecha à medida que a taxa de armadura longitudinal de tração aumenta até ao valor de $\rho \approx 1,5-2,0\%$. A partir destes valores o gráfico sugere que os índices de ductilidade de flecha para as vigas em estudo são muito pequenos e tendem lentamente para a unidade, independentemente da resistência do betão, pois nessas zonas os valores parecem estar menos dispersos. Parece assim que a redução dos índices de ductilidade de flecha, com o aumento da taxa de armadura longitudinal de tração, é menos sensível a partir de um determinado valor para a quantidade de armadura.

Para o gráfico da Figura 15 e para o índice de ductilidade de curvatura, os limites anteriores parecem ser um pouco maiores.

As observações anteriores confirmam os resultados gerais obtidos nos estudos de Shehata e Shehata [13] e Bernardo Lopes [11, 12] para vigas de betão de densidade normal. No entanto, nesses estudos os limites observados para a taxa de armadura de tração foram de $\rho \approx 3,0\%$, mostrando que existem diferenças comportamentais à flexão entre vigas de betão de densidade normal e de agregados leves.

Comparando os resultados obtidos nesta secção com os da secção anterior, torna-se evidente que a taxa de armadura longitudinal de tração é o parâmetro mais influente na ductilidade das vigas.

5. CONCLUSÕES

Os estudos realizados permitem formular as seguintes conclusões:

- O parâmetro mais influente na ductilidade das vigas, de entre os dois analisados neste estudo, é a taxa de armadura longitudinal de tração.
- Verifica-se uma pequena influência da resistência à compressão do betão na ductilidade das vigas, para taxas de armaduras aproximadamente constantes. Para um reforço longitudinal de tração constante, verificou-se que o aumento da resistência à compressão do betão incrementou ligeiramente a ductilidade. Este comportamento foi observado para o seguinte intervalo de resistências do betão: $22,0 \text{ MPa} \leq f_{ic} \leq 60,4 \text{ MPa}$.
- Observou-se também uma grande redução na ductilidade à flexão até taxas de armadura de $\rho \approx 1,5-2,0\%$, a partir da qual a ductilidade tende a desaparecer. No entanto, este limite é um pouco menor quando comparado com outros valores relatados em estudos com vigas de betão de densidade normal.
- De uma forma geral, parece poder afirmar-se que as variações da ductilidade em função da profundidade da linha neutra na rotura que se observam para as vigas de betão de densidade normal seguem as mesmas tendências nas vigas de betão de agregados leves e, por isso, podem ser aplicadas na prática de dimensionamento geral.

O estudo deve prosseguir com a realização de mais ensaios e análises.

REFERÊNCIAS

- [1] Kang, A.K.; Fjeld, S., *A Floating Concrete Platform Hull Made of Lightweight Aggregate Concrete*, Engineering Structures, 18(11): 831-6, (1996).
- [2] Melby, K.; Jordet, E.A.; Hansvold, C., *Long-Span Bridges in Norway Constructed in High-Strength LWA Concrete*, Engineering Structures, 18(11): 845-9, (1996).
- [3] Jorge, L.F.; Schanzlin, J.; Lopes, S.M.R.; Cruz, H.; Kuhlmann, U., *Time-Dependent Behaviour of Timber Lightweight Concrete Composite Floors*, Engineering Structures, 32(12): 3966-73, (2010).
- [4] Chai, Y.H.; Anderson, J.D., *Seismic Response of Perforated Lightweight Aggregate Concrete Wall Panels for Low-Rise Modular Classrooms*, Engineering Structures, 27(4): 593-604, (2005).
- [5] Sohel, K.M.A.; Liew, J.Y.R., *Steel-Concrete-Steel Sandwich Slabs with Lightweight Core – Static Performance*, Engineering Structures, 33(3): 981-92, (2011).
- [6] Pastor, J.A.; Nilson, A.H.; Slate, F.O., *Behaviour of High-Strength Concrete Beams*, Research Report 84-3, Department of Structural Engineering, Cornell University: 311pp, (1984).
- [7] Shin, S.-W.; Ghosh, S.K.; Moreno, J., *Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members*, ACI Journal, 86(4): 394-400, (1989).
- [8] Hansen, E.A.; Tomaszewicz, A., *Effect of Confinement on the Ductility of Structural Members with High Strength Concrete*, SINTEF Report STF65 F90071, Trondheim: 184-91, (1990).
- [9] Ahmad, S.H.; Barker, R., *Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams*, ACI Structural Journal, 88(1): 69-77, (1991).
- [10] Ahmad, S.H.; Batts, J., *Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement*, ACI Structural Journal, 88(3): 251-58, (1991).
- [11] Bernardo, L.F.A.; Lopes, S.M.R., *Flexural Ductility of HSC Beams*, Structural Concrete, 4(3): 135-54, (2003).
- [12] Bernardo, L.F.A.; Lopes, S.M.R., *Neutral Axis Depth versus Flexural Ductility in High-Strength Concrete Beams*, Journal of Structural Engineering, 130(3): 452-9, (2004).
- [13] Shehata, I.A.E.M.; Shehata, L.C.D., *Ductility of High-strength Concrete Beams in Flexure*, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete: 945-53, (1996).
- [14] Leslie, K.E.; Rajagopalan, K.S.; Everard N.J., *Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams*, ACI Journal, 73(9): 517-21, (1976).