

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS À ESCALA REAL PRODUZIDAS COM AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS DE BETÃO

(DYNAMIC CHARACTERIZATION OF FULL-SCALE STRUCTURES MADE WITH
RECYCLED COARSE CONCRETE AGGREGATES)

João Nuno Pacheco¹, Jorge de Brito², João Gomes Ferreira³, Diogo Soares¹

¹Aluno de Mestrado em Engenharia Civil, ICIST / IST / UL

²Professor Catedrático, ICIST / DECivil / IST / UL

³Professor Associado, ICIST / DECivil / IST / UL



RESUMO

O presente artigo apresenta um estudo do comportamento dinâmico de quatro estruturas produzidas à escala real com diferentes percentagens de incorporação de agregados grossos reciclados provenientes de elementos de betão da indústria de pré-fabricação. As estruturas foram caracterizadas por intermédio de operações de identificação modal, obtendo-se assim frequências próprias experimentais e estimando-se, a partir destas, o módulo de elasticidade, através da calibração de um modelo de elementos finitos. Verificou-se que o padrão de resposta das várias estruturas é idêntico e que os agregados utilizados possuem uma influência reduzida no módulo de elasticidade. Numa das composições de betão, foi introduzido um superplastificante, o que permitiu compensar a perda de rigidez originada pelo recurso a agregados reciclados. Apenas foi utilizada a fracção grossa dos agregados reciclados, visto que a incorporação da fracção fina resulta em perdas consideráveis nas propriedades mecânicas e de durabilidade [González-Fontebao e Martínez (2007) e Sato et al. (2007)]. Esta é a primeira investigação referente ao comportamento dinâmico de estruturas com agregados reciclados à escala real.

ABSTRACT

This paper is focused on the dynamic behaviour of four full-scale coarse recycled aggregate concrete structures by means of modal identification. A finite element model was made for each structure and its Young's modulus was calibrated with the values obtained from the tests made. The response pattern of the structures was not affected by the recycled aggregate incorporation and the aggregates used had a small influence on the Young modulus of concrete. One of the mixes included a superplasticizer that more than offset the loss of stiffness caused by the use of recycled aggregate. Only the use of the coarse fraction of the recycled aggregate was considered since the fine fraction tends to have a more detrimental effect on concrete properties [González-Fontebao and Martínez (2007) and Sato et al. (2007)]. To the author's best knowledge, this is the first study made regarding the dynamic behaviour of full-scale recycled aggregate concrete structures.

1- INTRODUÇÃO

A utilização de agregados reciclados (AR) no betão é vista como um passo rumo à sustentabilidade, proporcionando uma redução do uso de recursos naturais e dos resíduos produzidos. Depois da Segunda Guerra Mundial, começou-se a ter em atenção este tipo de material, devido às necessidades urgentes de construção de novos edifícios e infra-estruturas e à enorme quantidade de resíduos gerados em cidades destruídas por ataques aéreos. Hansen (1992) elaborou um estado-da-arte relativo à utilização de AR no final do século XX. Actualmente, existe um maior conhecimento sobre este tema, resultante de diversas investigações realizadas neste âmbito. Contudo, a maioria desses estudos incide sobre as propriedades (mecânicas e de durabilidade) ao nível do material de betões de agregados reciclados (BAR), sem considerar o desempenho estrutural deste tipo de betões.

Apenas recentemente têm surgido alguns trabalhos com o propósito de preencher esta lacuna, sendo a maior parte focada no comportamento de vigas sujeitas à flexão ou ao corte [González-Fonteboa e Martínez (2007 e 2009), Schubert *et al.* (2012) e Sogo *et al.* (2004)] ou de pilares, normalmente com soluções mistas (principalmente aço e BAR) [Yang *et al.* (2006), Xiao *et al.* (2012)]. O estado da arte em relação ao desempenho sísmico de estruturas de BAR é focado no desempenho de nós pilar-viga [Corinaldesi *et al.* (2010)] ou em pórticos planos (bidimensionais) [Li (2008), Xiao (2012), Xiao *et al.* (2006) e Wang e Xiao (2013)]. Até à data, nenhuma investigação foi realizada relativamente ao comportamento de pórticos tridimensionais à escala real de BAR. Adicionalmente, praticamente nenhum estudo foi encontrado pelos autores no que diz respeito a propriedades dinâmicas (modos de vibração e frequências) de estruturas ou protótipos à escala, produzidas com BAR. Os autores têm conhecimento de um único estudo sobre o comportamento sísmico de uma estrutura de BAR à escala 1:4 [Wang e Xiao (2013)].

A principal diferença entre um betão convencional (BR) e um BAR é o tipo de

agregados utilizados. Este último é composto por AR, que são constituídos por agregados naturais e pasta cimentícia aderida a estes. A presença desta argamassa influencia o comportamento do betão, devido principalmente à sua elevada porosidade e permeabilidade. Tal traduz-se nos seguintes aspectos: maior capacidade de absorção de água, reduções do desempenho relativo à durabilidade [Kwan *et al.* (2012) e Sim e Park (2011)], menor trabalhabilidade e, em geral, pior desempenho mecânico, o que se reflecte principalmente no módulo de elasticidade (E) [Berndt (2009), Fonseca *et al.* (2011) e Kou (2012)]. Contudo, existem vários estudos que comparam as propriedades de BAR com as do BR e os resultados são consensuais, concluindo que estes betões cumprem diversas regulamentações e normas.

A utilização de superplastificante pode compensar parte dos efeitos referidos, nomeadamente ao nível de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tracção [Barbudo *et al.* (2013), Matias *et al.* (2013) e Pereira *et al.* (2012)], devido principalmente à maior compacidade e menor relação água / cimento (para uma mesma trabalhabilidade) obtidas, embora a sua eficácia seja maior no BR do que nos BAR [Matias *et al.* (2013)].

2- CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1- Introdução e objectivos

Os agregados naturais utilizados foram agregados grossos de pedra calcária e areia fina rolada. Os AR foram obtidos pela britagem de elementos de betão da indústria de pré-fabricação que tinham a função de suportar vigas de longa extensão, tendo sido aproveitada apenas a sua fracção grossa (4-20 mm).

Pretendeu-se obter composições de betão com classe de resistência C25/30. Antes de se definir as quatro composições das estruturas, foram efectuados ensaios de resistência à compressão em diversas misturas de betão produzidas em laboratório. Estes ensaios tiveram como principal função definir a composição que possuísse a maior percentagem de AR sem originar decréscimos na resistência do

betão, bem como a composição, com substituição integral da fracção grossa dos agregados e superplastificante (SP), que maximizasse o incremento na resistência. As outras duas composições estavam inicialmente definidas, sendo elas um betão de referência e um betão com 100% de agregados grossos reciclados (AGR), sem SP (B100).

Após os ensaios realizados, constatou-se que a resistência à compressão dos betões não é afectada pela incorporação destes AGR, devido, muito provavelmente, à boa qualidade dos mesmos, originários de betões pré-fabricados de elevada resistência.

Assim, as quatro composições utilizadas nesta campanha foram: BR; B25 - com a máxima taxa de AGR (25%) permitida na especificação LNEC E 471 (2006) para betões estruturais; B100; e B100SP - com uma dosagem de 1% de superplastificante, relativa ao

peso do cimento. Estas composições são apresentadas no Quadro 1. As curvas granulométrica dos agregados seguiram um pedido do grupo Opway (empresa de construção que apoiou este projecto), com base na exequibilidade dos betões em obra.

O aço das armaduras utilizado foi um A500, com a classe de ductilidade B.

2.2- Modelos de ensaio

O projecto das estruturas de ensaio seguiu o especificado no Eurocódigo 2 (2004) e no Eurocódigo 8 (2004). Devido a algumas limitações relativas à futura execução de ensaios destrutivos horizontais, foram efectuadas algumas adaptações a estes regulamentos. A Figura 1 mostra a geometria dos modelos e a disposição das armaduras. As lajes têm espessura de 0,10 m e são reforçadas, na parte inferior,

Quadro 1 - Composição dos betões (kg/m³ de betão)

Materiais	Mistura de betão			
	BR	B25	B100	B100SP
Areia fina	249,62	243,78	245,05	258,84
Areia grossa	543,3	448,79	450,12	475,45
Agregados grossos naturais	4-11,2 mm	358,42	328,05	0
	11,2-22,4 mm	645,75	500,1	0
Agregados grossos reciclados	4-10 mm	0	83,32	333,27
	10-20 mm	0	170,96	683,83
Cimento CEM II A-L 42,5R	350	350	350	350
Água efectiva	185,5	185,5	185,5	143,5
Superplastificante	0	0	0	3,5

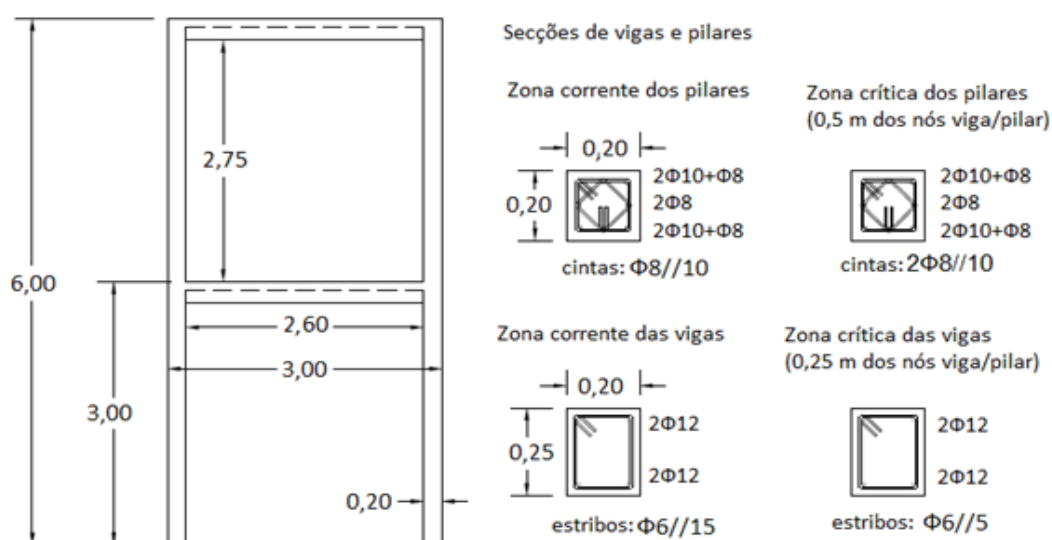


Fig 1 - Geometria e disposição das armaduras de cada estrutura

por uma malha de varões de 8 mm com espaçamento de 20 cm em ambas as direcções. As fundações são constituídas por blocos de betão armado de grandes dimensões que garantem um encastramento total dos pilares. O recobrimento dos pilares é de 2,5 cm, sendo de 2,0 cm no resto da estrutura.

Dadas as reduzidas dimensões dos elementos estruturais, os desvios na sua geometria podem ser significativos; deste modo, após a construção das estruturas, foi realizado um levantamento geométrico. A espessura das lajes foi considerada igual ao comprimento de carotes extraídas do seu centro, variando entre 10,5 e 11,6 cm. Por sua vez, as dimensões das secções dos pilares foram obtidas através da média de duas medições efectuadas no seu comprimento, variando entre 19,4 e 21,8 cm. A massa

volúmica de cada betão foi obtida através da média das pesagens de 16 provetes cúbicos de ensaio, produzidos durante a execução das estruturas. Foi realizado um MEF para cada estrutura, tendo em consideração as dimensões e as densidades observadas em obra. O Quadro 2 contém as frequências naturais predominantes e a densidade de cada estrutura, bem como o valor do E resultante de ensaios laboratoriais. A configuração de cada modo é indicada na Figura 2.

Os três primeiros modos de vibração horizontal previstos são um modo de translação, seguido de um modo de torção e um outro modo de translação. O primeiro modo de vibração vertical do primeiro piso, expectavelmente, terá uma frequência própria vertical superior à do primeiro modo do

Quadro 2 - Características dinâmicas de cada estrutura antes da calibração

Modo de vibração	Parâmetro	Estrutura			
		BR	B25	B100	B100SP
Horizontal, 1º modo	Densidade (kN/m ³)	24,2	24,0	23,4	23,7
	E _{lab} (GPa)	36,2	34,1	32,1	39,5
	Frequência (Hz)	4,02	3,91	3,84	4,18
	Descrição	Translação			
Horizontal, 2º modo	Frequência (Hz)	5,65	5,50	5,45	6,00
	Descrição	Torção			
Horizontal, 3º modo	Frequência (Hz)	11,35	11,14	10,89	11,76
	Descrição	Translação			
Vertical, laje 1º piso	Frequência (Hz)	30,25	29,78	29,84	32,13
	Descrição	Vertical			
Vertical, laje 2º piso	Frequência (Hz)	34,12	33,41	33,46	36,20
	Descrição	Vertical			

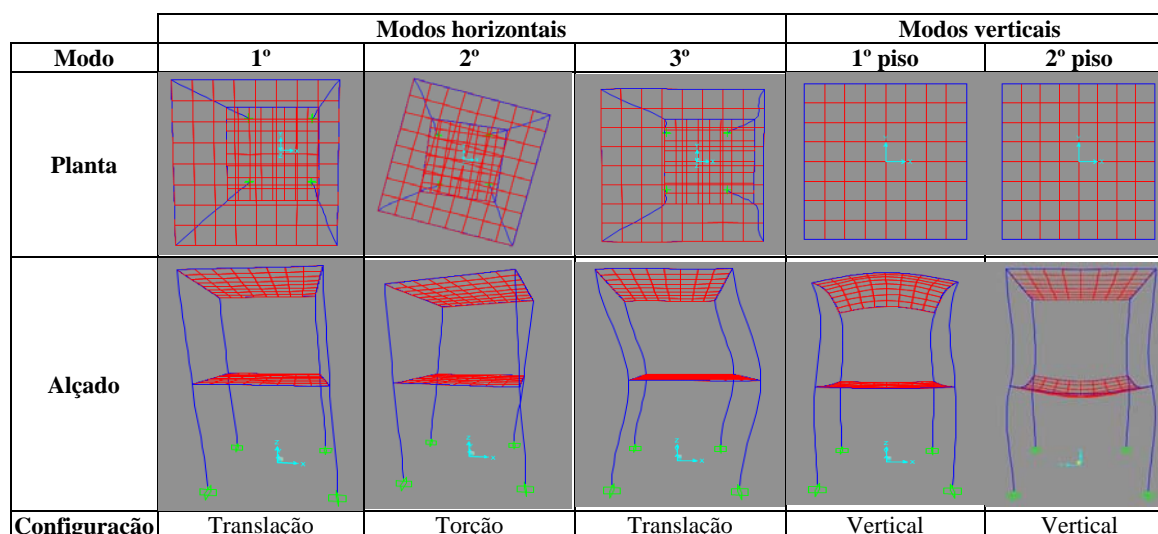


Fig 2 - Modos de vibração

segundo piso, dadas as menores restrições na laje deste último piso.

Tendo em conta o módulo de elasticidade determinado em laboratório, é esperado que a estrutura com maiores frequências de vibração seja a B100SP, seguida (nesta sequência) pela BR, B25 e, por último, a B100.

É expectável que ocorram algumas divergências nos resultados, devidos às condições de cura: apesar de todas as estruturas terem sido executadas durante o Verão, com o mesmo clima, e pela mesma empresa, o segundo piso da estrutura BR foi curado inadequadamente, existindo efeitos de retracção (fissuração) na laje correspondente. Deste modo, antecipou-se uma redução das frequências de vibração desta laje.

2.3- Procedimento de ensaio

As quatro estruturas foram ensaiadas 65 ± 5 dias após a execução do seu segundo (e último) piso. Todos os ensaios foram realizados duas vezes: uma delas com recurso a dois acelerómetros piezoeléctricos unidireccionais, conectados a amplificadores de sinal e a uma unidade de recepção de dados, a outra através de um sismógrafo de forte movimento triaxial. A Figura 3 mostra estes dois sistemas.

Para efeitos de análise de frequências

próprias horizontais, os acelerómetros foram posicionados nos nós pilar-viga, na direcção de excitação e ao nível de cada uma das lajes (duas configurações de ensaio distintas). O sismógrafo foi colocado em duas posições distintas em cada piso: uma no centro de cada laje, minimizando as leituras da frequência de torção, e outra próxima de um canto das mesmas, com excentricidade elevada, maximizando estas leituras. Quanto às excitações verticais, o posicionamento dos sismógrafos foi comum aos ensaios horizontais, enquanto que os acelerómetros foram dispostos no centro de cada laje. As posições referidas podem ser vistas na Figura 4. As características das leituras e sua subsequente análise de frequência são apresentadas no Quadro 3. As gamas de frequência estudadas não são limitadas pela frequência de Nyquist (frequência máxima que pode ser analisada por um determinado registo de teste, correspondente a metade da taxa de amostragem), em função dos filtros passa-baixa aplicados em ambas as configurações. A análise de frequência foi efectuada utilizando uma transformadora do tipo FFT (*Fast Fourier Transform*) com 4096 (2^{12}) pontos de amostragem.

Foram introduzidos três tipos de excitações: horizontal centrada, horizontal excêntrica e vertical. As duas primeiras foram



Fig 3 - Transdutores utilizados

Quadro 3 - Características dos aparelhos de ensaio e das funções de frequência

Equipamento	Taxa de amostragem	Máxima frequência	Filtro passa-baixo
Acelerómetros	300 Hz	150 Hz	100 Hz
Sismógrafo	200 Hz	100 Hz	80 Hz

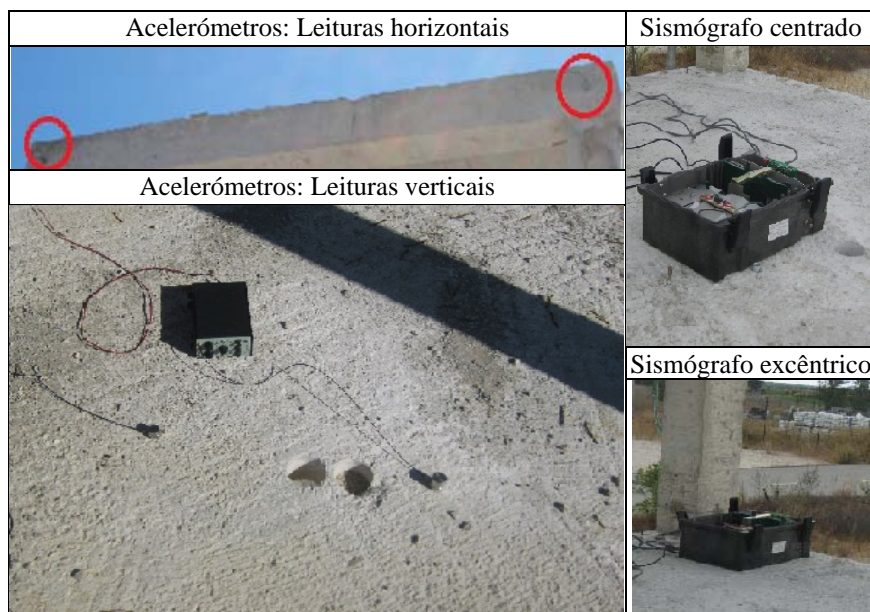


Fig 4 - Localização dos transdutores

impostas puxando manualmente uma corda e a excitação vertical foi executada por intermédio de saltos de pessoas em cima das lajes. Nenhum dos tipos de excitação teve intensidade ou frequência controladas. Na Figura 5, são visíveis as excitações horizontais realizadas no primeiro piso de uma estrutura - para o segundo piso as excitações foram idênticas. Adicionalmente, foram executados ensaios de vibração ambiente, para cada configuração de ensaio com recurso ao sismógrafo. As fontes de excitação ambiente foram, principalmente, o vento e veículos agrícolas em trabalho numa plantação vizinha.

3- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1- Modos de vibração, frequências e calibração dos MEF

A resposta às acções dinâmicas horizontais de todas as estruturas seguiu o MEF não calibrado, em termos qualitativos e sequenciais de modos de vibração. A análise estatística dos valores das frequências horizontais resultantes dos ensaios de vibração ambiente e de vibração forçada horizontal encontra-se exposta no Quadro 4. O intervalo de confiança, presente neste e nos quadros seguintes, foi calculado para um índice de significância de 0,05. A Figu-

ra 6 apresenta um exemplo (medições com o sismógrafo das vibrações forçadas) de frequências próprias e resultados estatísticos obtidos após *FFT*.

A análise da calibração do módulo de elasticidade (discutida mais adiante) proporciona uma melhor comparação do comportamento material das estruturas, particularmente devido às diferenças de geometria entre estas. Por exemplo, as frequências mais elevadas no pórtico de B25 em relação ao de BR podem ser uma consequência de pilares com uma secção transversal ligeiramente superior (causa para uma maior rigidez transversal), em detrimento de um módulo de elasticidade mais elevado.

Todos os ensaios foram utilizados para estimar o primeiro modo horizontal; para o segundo modo, das leituras efectuadas com o sismógrafo, apenas as correspondentes ao posicionamento excêntrico e com a estrutura submetida a excitação de torção foram utilizados. Os resultados fornecidos pelos acelerómetros que foram utilizados para determinar o segundo modo são os referentes à excitação excêntrica, tendo em consideração a diferença entre os valores de aceleração medidos em cada um dos acelerómetros (para o primeiro e terceiro modos, o valor utilizado foi a média das leituras). O terceiro modo foi considerado em todos os ensaios realizados, sempre que a *FFT* correspondente originou uma densidade espectral relevante.

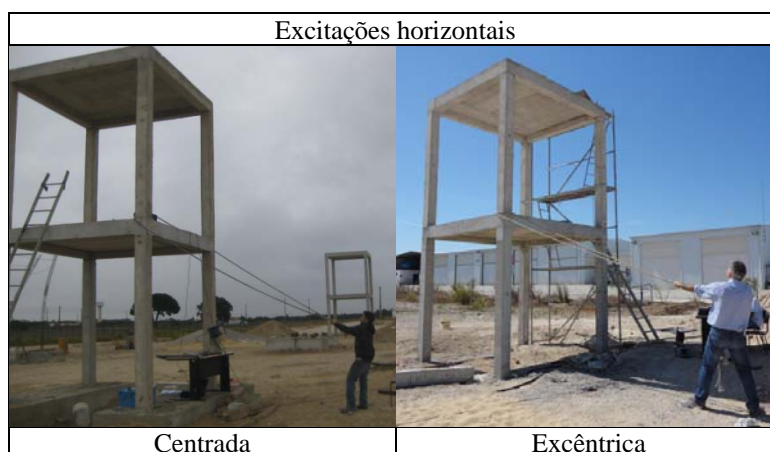


Fig 5 - Excitações horizontais realizadas (primeiro piso)

Quadro 4 - Parâmetros estatísticos: frequências horizontais

Equip.	Excitação	Parâmetro	BR			B25			B100			B100SP		
			Modo de vibração			Modo de vibração			Modo de vibração			Modo de vibração		
			1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
Sism.	Ambiente	N.º de ensaios	4	3	4	4	3	2	3	2	1	4	2	4
		Média (Hz)	3,97	5,96	11,42	3,87	5,77	11,01	3,71	5,59	11,57	4,29	6,45	12,55
		Mediana (Hz)	3,99	5,96	11,43	3,84	5,75	11,01	3,71	5,59	11,57	4,30	6,45	12,55
		Desvio-padrão (Hz)	0,05	0,05	0,08	0,10	0,08	0,38	0,06	0,04	-	0,03	-	0,04
		Intervalo de confiança (Hz)	0,05	0,05	0,08	0,10	0,09	0,53	0,06	0,06	-	0,02	-	0,04
	Forçada	N.º de ensaios	16	4	14	16	4	12	16	4	14	16	4	16
		Média (Hz)	3,97	5,76	11,20	4,01	6,01	11,26	3,69	5,56	11,35	4,30	6,40	12,41
		Mediana (Hz)	3,96	5,86	11,18	4,04	6,11	11,33	3,71	5,57	11,33	4,30	6,38	12,41
		Desvio-padrão (Hz)	0,03	0,20	0,11	0,10	0,20	0,29	0,04	0,02	0,14	0,02	0,07	0,05
		Intervalo de confiança (Hz)	0,02	0,19	0,06	0,05	0,20	0,16	0,02	0,02	0,07	0,01	0,07	0,03
Acel.	Forçada	N.º de ensaios	8	4	8	8	4	4	8	4	5	8	4	7
		Média (Hz)	3,94	5,82	11,15	3,98	5,86	11,34	3,69	5,55	11,4	4,26	6,43	12,36
		Mediana (Hz)	3,95	5,82	11,14	3,95	5,82	11,36	3,66	5,57	11,43	4,25	6,45	12,38
		Desvio-padrão (Hz)	0,04	0,05	0,05	0,13	0,11	0,41	0,04	0,04	0,08	0,05	0,04	0,05
		Intervalo de confiança (Hz)	0,03	0,05	0,04	0,09	0,11	0,40	0,03	0,04	0,07	0,03	0,04	0,04

Nota: Equip. - equipamento; Sism. - sismógrafo; Acel. – acelerómetros

Dos valores apresentados, confirma-se a consistência entre os ensaios ambientais e de vibração forçada e entre as leituras com o sismógrafo e os acelerómetros.

Os resultados obtidos sugerem que existe uma diminuição da frequência originada pela incorporação de AR, embora a estrutura de B25 apresente frequências ligeiramente mais elevadas do que a de BR, provavelmente devido às variações das condições de cura e execução das mesmas. Refira-se, no entanto, que existe uma sobreposição dos intervalos de confiança, como se vê na Figura 6. Contudo, a diferença registada entre os pórticos de B25 e BR e o pórtico

de B100 sugere que ocorre um decréscimo estatisticamente significativo da frequência com a utilização de AR no betão, o que é concordante com os estudos relativos ao módulo de elasticidade e às deformações apresentados na revisão bibliográfica.

O pórtico de B100SP foi o que teve frequências mais elevadas, o que se justifica pelo aumento do módulo de elasticidade originado pela utilização do SP, como constatado nos provetes ensaiados no laboratório e confirmado nos estudos de Barbudo *et al.* (2013), Matias *et al.* (2013) e Pereira *et al.* (2012).

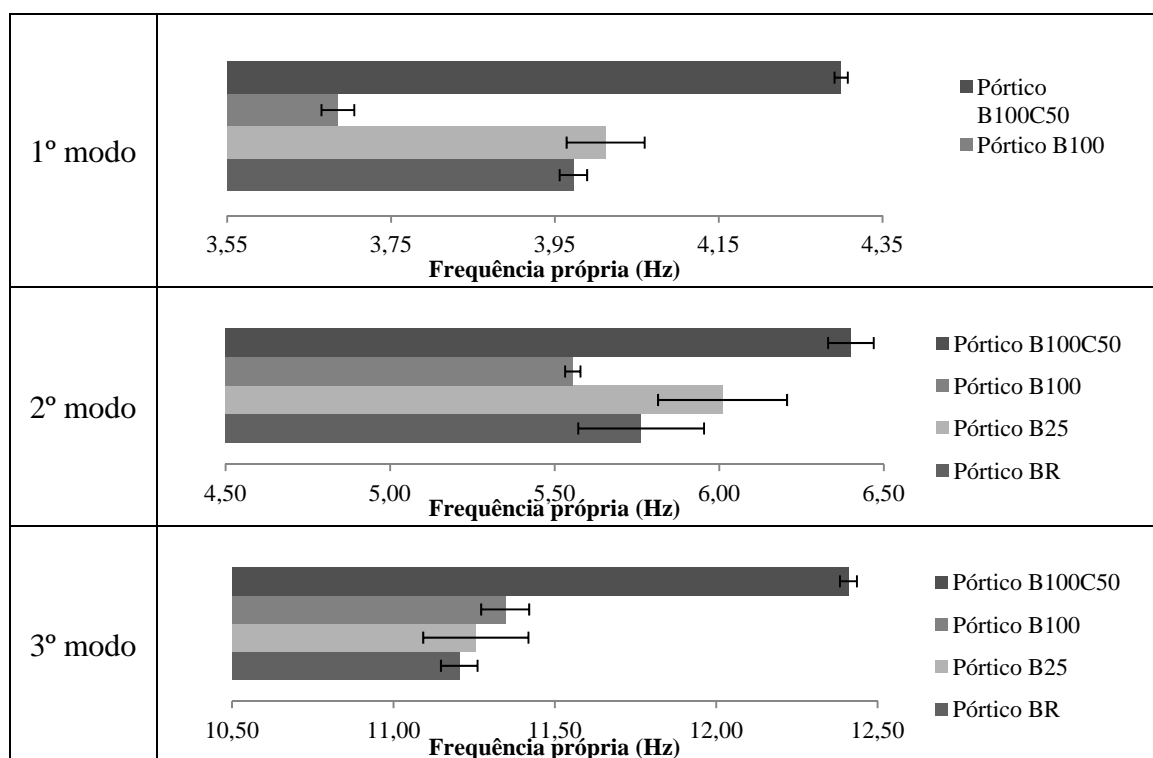


Fig 6 - Valores médios das frequências horizontais e intervalos de confiança (vibrações forçadas, sismógrafo)

Quadro 5 - Parâmetros estatísticos: frequências verticais

Equip.	Excitação	Parâmetro	BR		B25		B100		B100SP	
			Laje	Laje	Laje	Laje	Laje	Laje		
			1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Ambiente		N.º de ensaios	2	2	2	2	2	1	2	2
		Média (Hz)	32,75	26,1	37,27	35,85	32,85	30,64	36,48	38,17
		Desvio-padrão (Hz)	1,06	0,48	5,04	3,32	1,35	-	3,73	0,38
		Intervalo de confiança (Hz)	1,47	0,67	6,99	4,60	1,87	-	5,17	0,53
Sism.	Forçada	N.º de ensaios	4	4	4	4	4	4	4	4
		Média (Hz)	32,15	24,36	33,97	30,54	31,00	30,98	38,63	38,49
		Mediana (Hz)	32,38	24,35	34,35	30,99	31,04	30,97	38,54	38,44
		Desvio-padrão (Hz)	0,50	0,46	1,99	1,06	0,28	0,14	0,17	0,17
		Intervalo de confiança (Hz)	0,49	0,46	1,95	1,04	0,28	0,14	0,17	0,17
Acel.	Forçada	N.º de ensaios	2	2	2	2	2	2	2	2
		Média (Hz)	32,0	25,2	32,9	31,1	31,4	31,1	37,0	37,6

Nota: Equip. - equipamento; Sism. - sismógrafo; Acel. - acelerómetros

As frequências próprias verticais experimentais (Quadro 5) são bastante dependentes da espessura das lajes, não tendo sido encontrada nenhuma tendência relativa à incorporação de AR. Os resultados obtidos para este tipo de frequência apresentam uma maior dispersão do que as frequências horizontais, principalmente devido ao menor número de amostras.

A calibração do módulo de elasticidade foi efectuada individualmente, para cada ensaio, assegurando uma melhor análise

estatística. Deu-se maior ênfase aos resultados do módulo de elasticidade do que aos valores de frequência, o dado que as diferenças na geometria das estruturas influenciam o valor das frequências e que o objectivo era comparar o comportamento dos betões. O critério de calibração de E nos MEF consistiu em forçar a coincidência entre a primeira frequência própria horizontal numérica e a experimental. Teve-se em conta a retracção notada na laje do segundo piso do pórtico de BR, reduzindo-se, para o efeito, o módulo de elasticidade desta laje

para 65% do valor da restante estrutura - considerou-se este valor com base num ensaio de carga estática vertical realizado. No Quadro 6, são apresentados, para cada meio de leitura, os valores médios do módulo de elasticidade, após a calibração realizada e os erros relativos para cada modo de vibração (naturalmente, não se apresentam erros referentes ao primeiro modo).

Para melhor avaliar o significado experimental destes resultados, efectuou-se testes-t, para uma hipótese de variâncias desiguais, com os valores de cada módulo de elasticidade

calibrado, comparando os três pórticos compostos por betão com AR com o de BR. Os resultados mostram que o valor do módulo de elasticidade dos pórticos de B100SP e B100 é, respectivamente, superior e inferior ao do de BR. A comparação entre o pórtico de BR e o de B25 foi estatisticamente inconclusiva. Estes resultados podem ser consultados no Quadro 7. O índice de significância utilizado nos testes-t foi o mesmo do cálculo dos intervalos de confiança (0,05). Por fim, realizou-se uma comparação destes valores com os obtidos em laboratório (Quadro 8). Concluiu-se que a diferença nos

Quadro 6 - Módulos de elasticidade calibrados e erros relativos (entre as frequências numéricas e as experimentais)

Equip.	Estrutura	Parâmetro	E (GPa)	Erro relativo				
				Modos horizontais		Modos verticais		
				2º modo	3º modo	2ª laje	1ª laje	
Sism.	BR	N.º de ensaios	16	4	14	4	4	
		Média	35,31	4,05%	0,97%	9,75%	4,19%	
	B25	N.º de ensaios	16	4	12	4	4	
		Média	35,82	6,69%	2,10%	3,10%	4,51%	
	B100	N.º de ensaios	15	6	14	4	4	
		Média	30,72	7,09%	7,83%	9,82%	2,42%	
	B100SP	N.º de ensaios	16	4	16	4	4	
		Média	41,03	4,75%	2,38%	17,27%	5,02%	
	Acel.	BR	N.º de ensaios	4	4	4	2	2
			Média	33,99	5,83%	0,96%	13,93%	3,34%
B25		N.º de ensaios	4	4	4	2	2	
		Média	36,15	3,37%	3,68%	2,36%	5,45%	
B100		N.º de ensaios	4	4	4	2	2	
		Média	30,66	6,18%	8,38%	10,24%	10,24%	
B100SP		N.º de ensaios	4	4	4	2	2	
		Média	33,99	6,26%	2,83%	14,60%	3,57%	

Quadro 7 – Resultados dos testes-t

Comparação	Vibração e meio de medição	Valor p
REF vs B25	Ambiente, sismógrafo	0,106
	Forçada, sismógrafo	0,332
	Forçada, acelerómetros	0,272
REF vs R100	Ambiente, sismógrafo	0,003
	Forçada, sismógrafo	8,11E-18
	Forçada, acelerómetros	3,11E-08
REF vs R100SP	Ambiente, sismógrafo	5,63E-05
	Forçada, sismógrafo	6,78E-24
	Forçada, acelerómetros	2,55E-09

módulos de elasticidade é inferior a 5%.

Algumas observações devem ser realizadas a respeito destes resultados:

- foi observado um erro relativamente elevado nos ensaios referentes à laje do segundo piso da estrutura de BR (mesmo tendo em conta a diferença de rigidez de acordo com os resultados do ensaio estático vertical);
- o erro relativo da laje do segundo piso da estrutura de B100SP é o mais elevado, provavelmente devido às condições de execução (as estruturas com SP são mais susceptíveis a variações na amassadura do betão);
- poderia ter sido obtido um menor erro relativo caso se considerasse propriedades materiais variáveis em cada estrutura, principalmente para as lajes dos segundos pisos. Esta hipótese não foi considerada pois poderia originar resultados artificialmente correctos, sem validade física;
- os intervalos de confiança do módulo de elasticidade dos pórticos de BR e B25 sobrepõem-se e, muito provavelmente, a justificação para o maior valor médio da rigidez do pórtico de B25 deve-se a questões relacionadas com a execução das estruturas (tendo a laje do piso superior do pórtico de BR retraído significa-

tivamente, é possível que pilares e vigas também o tenham feito, a um nível muito menor, dada a presença de cofragens na cura inicial e a menor área de exposição deste tipo de elementos); a comparação efectuada através do teste-t revelou que a diferença entre os pórticos não é estatisticamente conclusiva;

- os resultados referentes ao pórtico de B100SP provam que existe um aumento de rigidez nos BAR associada à utilização de SP no fabrico de betão;
- a boa qualidade dos agregados gerados através de elementos de betão pré-fabricados foi confirmada, verificando-se um decréscimo de E de apenas cerca de 10% relativamente a um betão convencional, para uma substituição integral da fracção grossa dos agregados;
- a tendência (e os resultados) da calibração do módulo de elasticidade para as várias estruturas seguiu os resultados laboratoriais, com diferenças entre os resultados inferiores a 5%.

4- CONCLUSÕES

Esta campanha experimental teve como objectivo avaliar o efeito da incorporação de AR nas propriedades dinâmicas de estruturas de betão, obtendo-se as seguintes conclusões:

Quadro 8 - Comparação entre o módulo de elasticidade calibrado e o obtido em laboratório

Origem dos resultados		Estrutura			
		BR	B25	B100	B100SP
Laboratório		36,20	34,10	32,10	39,50
Ambiente, sismógrafo	Valor médio	35,31	33,37	31,17	40,79
	Razão com laboratorial	0,98	0,98	0,97	1,03
Forçada, sismógrafo	Valor médio	35,37	35,82	30,72	41,03
	Razão com laboratorial	0,98	1,05	0,96	1,04
Forçada, acelerómetros	Valor médio	34,73	35,63	30,83	40,13
	Razão com laboratorial	0,96	1,04	0,96	1,02

1. O padrão de comportamento foi semelhante entre todas as estruturas analisadas, com frequências naturais e configurações modais de acordo com as obtidas nos modelos numéricos;
2. Os valores do módulo de elasticidade estimados com recurso a este método são consistentes com os obtidos nos ensaios laboratoriais;
3. Os resultados demonstram que existe uma redução do módulo de elasticidade com a utilização de AR no betão (sem SP);
4. Provou-se a aplicabilidade e a boa qualidade deste tipo de agregados, gerados da reciclagem de elementos pré-fabricados, com uma reduzida diminuição do módulo de elasticidade (cerca de 10%) e de massa (4%), para uma substituição total da fracção grossa dos agregados;
5. O uso de superplastificante na mistura com a totalidade da fracção grossa constituída por AR revelou-se uma boa opção, sendo o valor do módulo de elasticidade o mais elevado de entre todas as composições analisadas.

Por comparação das propriedades das três estruturas de BAR com as da estrutura produzida com um betão convencional, mostra-se que a utilização de AR é adequada.

O comportamento de estruturas com este tipo de agregados é análogo ao de estruturas convencionais. A avaliação das propriedades dinâmicas pode ser realizada através de métodos correntes e, para AR de elevada qualidade, o decréscimo do módulo de elasticidade é insignificante. O uso de superplastificantes é eficiente para compensar as perdas ocorridas ao nível desta propriedade.

Considera-se que todos os resultados obtidos devem ser incorporados nas poucas normas de betão que consideram a utilização de AR no mesmo [Gonçalves e Brito (2010)].

REFERÊNCIAS

González-Fonteboa, B.; Martínez, F. (2007), Shear strength of recycled concrete beams,

Construction & Building Materials, Vol. 21 (4), pp.:887 -893

Sato, R.; Mauryama, I.; Sogabe, T.; Sogo, M. (2007), Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5 (1), pp. 43-61

Hansen, T. C. (1992), Recycling of demolished concrete and masonry. Part one: recycled aggregates and recycled aggregate concrete; Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete, pp. 1-139

González-Fonteboa, B.; Martínez, F.; Martínez, I.; Eiras, J., (2009), Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume, Construction & Building Materials, Vol. 23 (11), pp. 3406 - 3410

Schubert, S.; Hoffmann, C.; Leemann, A.; Moser, K.; Motavalli, M. (2012), Recycled aggregate concrete: Experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement, Engineering Structures, Vol. 41, pp. 490-497

Sogo, M.; Sogabe, T.; Maruyama, I.; Sato, R.; Kawai, K. (2004), Shear behavior of reinforced recycled concrete beams, Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, RILEM, Barcelona, pp. 526-535

Yang, Y.-F.; Han, L.-H. (2006), Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 1310-1324

Xiao, J.; Huang, Y.; Yang, Y.; Zhang, Ch. (2012), Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression, Construction & Building Materials, Vol. 26, pp. 593-603

Corinaldesi, V.; Letelier, V.; Moriconi, G. (2010), Behaviour of beam-column joints made of recycled-aggregate concrete under cyclic loading, Construction & Building Materials, Vol. 25 (4), pp. 1877-1882

Li, X. (2008), Recycling and reuse of waste concrete in China Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications, Resources, Conservation, and Recycling, Vol. 53 (3), pp. 107-112

Xiao, J. (2012), An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-

- 2011), *Construction & Building Materials*, Vol. 31 (1), pp. 364-373
- Xiao, J.; Sun, Y.; Falner, H. (2006), Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete, *Engineering Structures*, Vol. 28 (1), pp. 1-8
- Wang, C.; Xiao, J (2013), Study of the seismic response of a recycled aggregate concrete frame structure, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 12, pp. 669-680
- Kwan, W. H.; Mahyuddin, R.; Kam, K. J.; Sulieman, M. Z. (2012), Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties, *Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp. 565-573
- Sim, J.; Park, C. (2011), Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate, *Waste Management*, Vol. 31, pp. 2352-2360
- Berndt, M. L. (2009), Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2606-2613
- Fonseca, N.; de Brito, J.; Evangelista, L. (2011), The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, pp. 637-643
- Kou, S.-C.; Poon, C.-S.; Wan, H.-W. (2012), Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 881-889
- Barbudo, A.; de Brito, J.; Evangelista, L.; Bravo, M.; Agrela, F. (2013), Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 59, pp. 93-98
- Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A.; Pedro, D. (2013), Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates-influence of the use of superplasticizers, *Construction & Building Materials*, Vol. 44, pp. 101-109
- Pereira, P.; Evangelista, L.; de Brito, J. (2012), The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Construction & Building Materials*, Vol. 28, pp. 722-729
- LNEC E 471 (2006), Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal
- Eurocode 2 Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN1992-1-1 (2004), European Committee for Standardisation
- Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN1998-1-1 (2004), European Committee for Standardisation
- Gonçalves, P.; de Brito, J. (2010), Recycled Aggregate Concrete (RAC) - Comparative analysis of existing specifications, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62 (5), pp. 339-346

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das seguintes entidades: Opway, IST, Universidade de Lisboa, ICIST e FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).