

## DESEMPENHO MECÂNICO DE BETÃO ESTRUTURAL PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DA INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO



Diogo Pedro

Mestre em Eng.<sup>a</sup> Civil  
IST  
Lisboa  
[diogo.pedro@ist.utl.pt](mailto:diogo.pedro@ist.utl.pt)



Jorge de Brito

Professor Catedrático  
IST  
Lisboa  
[jb@civil.ist.utl.pt](mailto:jb@civil.ist.utl.pt)



Luís Evangelista

Professor Adjunto  
ISEL  
Lisboa  
[evangelista@dec.isel.ipl.pt](mailto:evangelista@dec.isel.ipl.pt)

### SUMÁRIO

O presente trabalho pretende avaliar a viabilidade de utilizar agregados reciclados de betão pré-fabricado (ARB), em betão estrutural. Neste sentido, foi realizada uma campanha experimental, sendo avaliadas as propriedades de resistência à compressão em cubos e cilindros, resistência à tracção por compressão diametral, módulo de elasticidade e ultrasons. Na produção das misturas, foram utilizados agregados finos (AFRB) e grossos (AGRB) reciclados, provenientes de betões com resistências de cerca de 65 MPa. As percentagens de substituição de agregados naturais (AN) por ARB foram as seguintes (AFRB/AGRB%): 25/25%; 50/50%; 100/0%; 0/100% e 100/100%. Os resultados mostram que, apesar da perda de desempenho, os betões reciclados (BAR) poderão ser utilizados como betão estrutural.

**Palavras-chave:** betão estrutural; agregados reciclados; desempenho mecânico.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o seu início que a aplicação de agregados reciclados (AR) tem sido frequentemente limitada a fins de baixo valor acrescentado, como betões não estruturais ou bases de estrada. A principal causa desta situação é uma percepção negativa do desempenho dos betões com AR [1;2]. Apesar de já existir alguma investigação que prova o contrário, este paradigma ainda não foi alterado [3].

Na verdade, os agregados reciclados de betão são em princípio de qualidade inferior à dos agregados naturais. Esta situação deve-se à presença de argamassa aderida que é responsável por diminuir a massa volúmica e aumentar a absorção de água e porosidade dos AR face aos agregados naturais (NA) [4-6]. As características referidas podem conduzir a uma diminuição da quantidade de água eficaz para o processo de hidratação e, por conseguinte, originar uma ITZ (*Interfacial Transition Zone*) mais fraca entre o agregado reciclado e a pasta de cimento [7]. Contudo, existe actualmente conhecimento suficiente para controlar estas desvantagens.

O controlo da qualidade dos betões com agregados reciclados (BAR) pode ser feito através de diversos aspectos: quantidades de água e cimento [8]; condições de cura [9]; recurso a adições [10] e a adjuvantes [11-12]. Também a origem, as condições de humidade e o processo de trituração dos AR são aspectos a ter em atenção [13-15]. Os AR utilizados nos betões podem ainda ser objecto de tratamentos, de forma a melhorar as suas propriedades [5;16].

Desta forma, existem vários estudos que mostram que é possível produzir betão com agregados grossos reciclados com resistências semelhantes às dos betões convencionais [13;17;18].

Relativamente à utilização de agregados finos de betão, constata-se não existir um número significativo de estudos. Esta realidade pode ser justificada pela crença de que a incorporação de agregados finos reciclados de betão (AFRB) compromete o desempenho dos BAR, sobretudo para taxas de substituição superiores a 30% [19]. Nas investigações de [20] e [21], foram verificadas diminuições de resistência à compressão de cerca de 35%, para uma taxa de incorporação de 100%. Os resultados são justificados pelos investigadores pela presença de impurezas, argamassa aderida e maior taxa de absorção de água dos AFRB, uma vez que contribuem para a degradação das ligações entre os agregados e a nova matriz cimentícia. A menor massa específica dos AFRB em comparação com os AN poderá ser outra das causas para as perdas de desempenho registadas.

Contudo, na investigação de Evangelista e Brito [22], foram obtidas diminuições menos significativas devido à presença de AFRB. Foram registadas perdas de resistência, aos 28 dias, de 4 e 8% para as taxas de substituição de 30 e 100%, respectivamente.

No que respeita à utilização conjunta de AFRB e de agregados grossos reciclados de betão (AGRB), a informação é ainda mais reduzida. Um dos poucos estudos existentes tem cerca

de 30 anos. Foi realizado por Ravindrarajah et al. [23] e pretendeu analisar os efeitos da utilização de AR sobre a resistência e a deformação do betão. Os resultados mostraram que, para um betão com agregados reciclados, a resistência e o módulo de elasticidade, em relação ao BR, foram reduzidos em cerca de 10 e 35%, respectivamente.

Noutro estudo, Poon et al. [24] procuraram desenvolver uma técnica para a produção de tijolos e blocos de pavimento em betão. Foram consideradas taxas de substituição até 100% (em peso), com ou sem incorporação de cinzas volantes. Os resultados mostraram que a substituição de agregados naturais (finos e grossos) por AR, em níveis de 25 e 50%, tem um impacto mínimo sobre a resistência à compressão (variações de 5%). No entanto, para a taxa de substituição de 100%, os betões com resistências de 40-65 MPa, exibiram uma diminuição, em relação ao betão de referência (BR), de cerca de 14%.

No trabalho de Ajdukiewicz e Kliszczewicz [25], analisou-se a influência de agregados reciclados nas propriedades mecânicas dos betões de elevada resistência/elevado desempenho. Os autores concluíram que a incorporação de 100% de AFRB e AGRB provocou diminuições de resistência à compressão de cerca de 10-20%.

Sim e Park [21] pretenderam avaliar a influência de AFRB e de AGRB, em betões estruturais. Nesta investigação, foram consideradas várias taxas de substituição de agregados finos naturais por AFRB, enquanto os agregados grossos naturais foram completamente substituídos por AGRB. Foram também utilizados vários níveis de adição de cinzas volantes. Os resultados mostraram que a resistência à compressão diminuiu com a taxa de incorporação de AR. Foram verificadas diminuições de cerca de 6, 9, 15, 25 e 30%, para as taxas de substituição de 30, 50, 60, 70 e 100%, respectivamente. Contudo, independentemente das condições de cura e da adição de cinzas volantes, a resistência dos BAR foi maior do que a resistência de projecto definida (40 MPa), para as situações de substituição total de agregados grossos e níveis de incorporação de AFRB até 60%.

Finalmente, no trabalho de Khoshkenari et al. [26], teve-se como objectivo investigar o papel da fracção 0-2 mm nas propriedades do betão. Os resultados mostraram também diminuições de desempenho de resistência à compressão e à tracção por compressão diametral, com a utilização de agregados reciclados.

## 2. MATERIAIS

Na produção das misturas, foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (areia de rio), agregados grossos naturais (pedra calcária triturada), agregados finos e grossos reciclados de betão, cimento, superplastificante e água. O cimento (CEM I 42,5R) foi utilizado na quantidade de 350 kg/m<sup>3</sup>. Relativamente ao superplastificante (SikaPlast 898), foi adicionado na proporção de 1% da massa de cimento. No que respeita aos agregados, as suas propriedades são apresentadas no Quadro 1.

Os resultados mostram que, devido à quantidade residual de argamassa aderida, os valores

de absorção de água dos AR são muito superiores aos dos agregados naturais. Esta realidade é ainda mais evidente para a fracção fina. Por conseguinte, é expectável que os BAR apresentem maiores relações a/c. No entanto, os AR utilizados conseguem cumprir os requisitos necessários para a sua aplicação em betão [27]. Estes limites para agregados grossos e finos reciclados foram fixados em 7 e 13%, respectivamente.

Quadro 1. Propriedades dos agregados

Tipo de agregado	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )			Absorção de água (%)
	Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Areia fina	2630	2620	2623	0,2
Areia grossa	2640	2610	2620	0,5
Brita 1	2700	2670	2680	0,6
Brita 2	2710	2670	2690	0,6
AFRB	2675	2297	2439	6,1
AGRB	2614	2371	2464	3,9

Relativamente aos valores de massa volúmica, verifica-se uma maior proximidade entre AR e AN. As diferenças não ultrapassam 12%. Além disso, utilizando o sistema de classificação proposto por Silva et al. [28], constata-se que todos os agregados reciclados desta campanha, em termos de valores de massa volúmica, poderiam pertencer à classe A (agregados de melhor qualidade).

### 3. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado fresco (trabalhabilidade e massa volúmica). Estes ensaios pretendem avaliar a conformidade da classe de consistência definida para todos os betões (S3) e a massa volúmica dos betões produzidos. Por facilidade de linguagem, as taxas de 25/25, 50/50 e 100/100% também serão designadas, neste relatório, por 25, 50 e 100%, respectivamente.

#### 3.1 Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi efectuado segundo a norma NP EN 12350-2 [29]. Foi definido um abaixamento alvo de 125 mm, com uma tolerância máxima de 15 mm relativamente a este valor. No Quadro 2, são apresentados os resultados obtidos.

Quadro 2. Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

Tipo de betão	Relação a/C <sub>efectiva</sub>	Abaixamento (mm)
BR 0/0	0,47	115
B 25/25	0,47	122
B 50/50	0,48	135
B 100/0	0,49	127
B 0/100	0,47	122
B 100/100	0,49	128

Através da observação do quadro, constata-se que todos os betões produzidos respeitam o intervalo  $125 \pm 15$  mm. De forma a garantir trabalhabilidades idênticas, foi necessário aumentar a relação água / cimento dos BAR. Esta situação foi mais evidente para as maiores taxas de substituição e pode ser explicada através da elevada absorção do material reciclado.

### 3.2 Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 [30]. No Quadro 3 e Figura 1, são apresentados os resultados.

Quadro 3. Resultados do ensaio de massa volúmica

Tipo de betão	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)
BR 0/0	2428,3	0,0
B 25/25	2371,8	-2,3
B 50/50	2352,2	-3,1
B 100/0	2337,3	-3,7
B 0/100	2357,3	-2,9
B 100/100	2300,8	-5,3

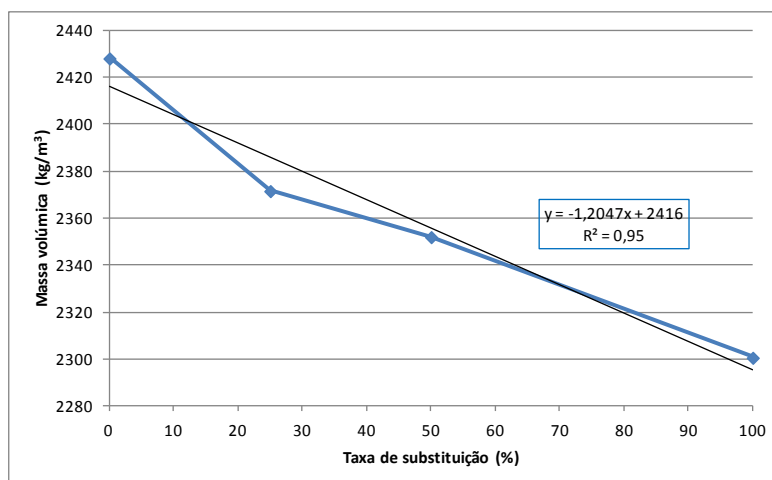


Figura 1. Resultados do ensaio de massa volúmica

Analisando o Quadro 3, verifica-se que a massa volúmica do betão no estado fresco diminui com o aumento da percentagem de AR. Esta diminuição parece ocorrer de forma aproximadamente linear (Figura 1).

Os resultados podem ser justificados com a menor massa volúmica dos agregados reciclados, comparativamente aos agregados naturais.

Pode-se também observar que esta redução é ligeiramente mais significativa quando são utilizados AFRB. Nos betões em que agregados finos naturais (AFN) foram substituídos por

AFRB, foram verificadas reduções de 4%, em relação ao BR, enquanto nos betões com 100% de AGRB as diminuições foram de 3%.

#### 4. PROPRIEDADES EM TERMOS MECÂNICOS

Neste subcapítulo, são avaliadas as características mecânicas de betões com agregados reciclados, através da comparação com betões de referência.

##### 4.1 Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão foi efectuado aos 28 dias segundo a norma NP EN 12390-3 [31]. No Quadro 4, são apresentados os resultados obtidos.

Quadro 4. Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Tipo de betão	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P
BR 0/0	72,6	0,0	1,7
B 25/25	68,2	-6,1	1,2
B 50/50	66,5	-8,5	0,3
B 100/0	65,4	-10,0	2,2
B 0/100	68,7	-5,4	1,6
B 100/100	61,8	-14,9	1,2

Aos 28 dias, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, observa-se uma diminuição de resistência, relativamente ao betão de referência, de cerca de 6, 9 e 15%, respectivamente. Os resultados mostram que existe uma tendência para a diminuição linear da resistência com o aumento da quantidade de AR (Figura 2).

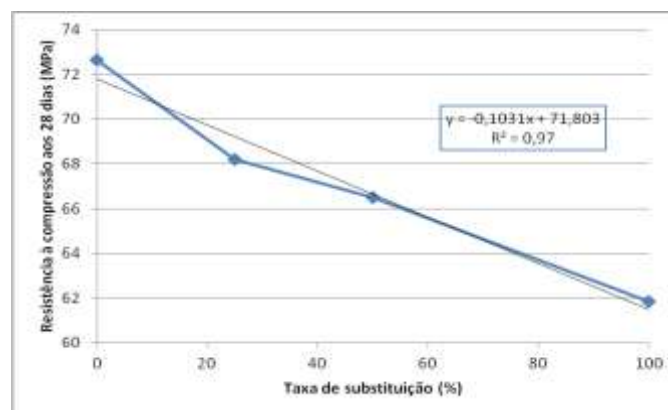


Figura 2. Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Esta situação pode ser explicada pela pior qualidade dos AR, que tem origem na sua argamassa aderida, responsável por diminuir a massa volúmica e aumentar a absorção destes agregados [32]. Além das consequências referidas, a presença de argamassa aderida poderá também prejudicar a ligação entre o agregado e a matriz de cimento e, conseqüentemente, piorar as características de transferência de carga, provocando uma redução de resistência [33].

Por estes motivos, relativamente aos betões convencionais, os BAR tendem a apresentar menores massas volúmicas e relações a/c superiores, o que prejudica o seu desempenho. Ajdukiewicz e Kliszczewicz [25] obtiveram resultados semelhantes. Os BAR com 100% de agregados reciclados (finos e grossos) exibiram uma diminuição máxima, em relação ao BR, de cerca de 20%.

Analisando o Quadro 4, verifica-se que a incorporação de 100% de agregados grossos reciclados provoca reduções de resistência, em relação ao BR, de aproximadamente 5%.

Nos betões em que a totalidade dos AFN foi substituída, as reduções observadas foram de cerca de 10%. Esta situação era expectável, uma vez que os agregados finos reciclados evidenciam maiores necessidades de água. Deste modo, a incorporação de AFRB parece ser mais prejudicial ao desempenho dos betões [2].

Os resultados apresentados parecem indicar que, em termos de resistência à compressão, é possível a utilização de agregados reciclados na grande maioria dos elementos estruturais, cuja resistência se situa, geralmente, abaixo de 50 MPa.

#### 4.2 Resistência à compressão em cilindros

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12390-3 [31] aos 28 dias. No Quadro 5, são apresentados os resultados obtidos.

Quadro 5. Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros

Tipo de betão	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	58,4	0,0	1,1
B 25/25	54,7	-6,3	1,0
B 50/50	53,6	-8,2	1,0
B 100/0	49,6	-15,1	0,6
B 0/100	54,8	-6,1	0,9
B 100/100	49,4	-15,4	1,2

Tal como a resistência à compressão em cubos, também a resistência à compressão em cilindros diminui com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão. Através da análise do Quadro 5, verifica-se que os betões que incorporaram agregados de pré-fabricação apresentaram valores entre 49.4 e 54.8 MPa. O BR evidenciou uma resistência de 58.4 MPa. Deste modo, observa-se uma diminuição máxima de aproximadamente 15%. Os resultados são justificados pelos motivos anteriores, ou seja, pela argamassa aderida à superfície dos AR. Nesta propriedade, constata-se igualmente uma diminuição linear da resistência para taxas de substituição de 25, 50 e 100% (Figura 3) e uma maior influência dos finos no desempenho dos betões.

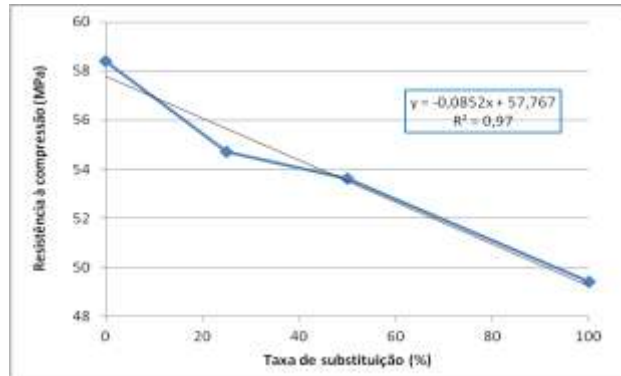


Figura 3. Resultados do ensaio de resistência à compressão em cilindros

Quanto à relação entre resistência em cilindros e em cubos, verifica-se que, aos 28 dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 79,5 % da tensão de rotura dos cubos (Quadro 6).

Quadro 6. Relações das resistências obtidas aos 28 dias em cubos e cilindros

Tipo de betão	Resistências médias obtidas $f_{cm,28}$ (MPa)		Relação da resistência cilindro / cubo
	Cubo	Cilindro	
BR 0/0	72,6	58,4	0,80
B 25/25	68,2	54,7	0,80
B 50/50	66,5	53,6	0,81
B 100/0	65,4	49,6	0,76
B 0/100	68,7	54,8	0,80
B 100/100	61,8	49,4	0,80

#### 4.3 Resistência à tracção por compressão diametral

Este ensaio foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 12390-6 [34]. No Quadro 7, são apresentados os resultados obtidos.

Quadro 7. Resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

Tipo de betão	Resistência à tracção (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	4,6	0,0	0,1
B 25/25	3,9	-15,0	0,0
B 50/50	3,6	-20,6	0,1
B 100/0	3,3	-28,4	0,3
B 0/100	3,9	-14,0	0,2
B 100/100	3,0	-35,1	0,1

Observando o quadro, constata-se que o BR apresentou uma resistência à tracção por compressão diametral de 4,6 MPa. No que respeita aos betões com agregados reciclados de pré-fabricação, os valores variaram entre 3,0 e 3,9 MPa.

Na Figura 6, é visível a diminuição desta propriedade com a incorporação de AR, ocorrendo variações máximas de 35%.



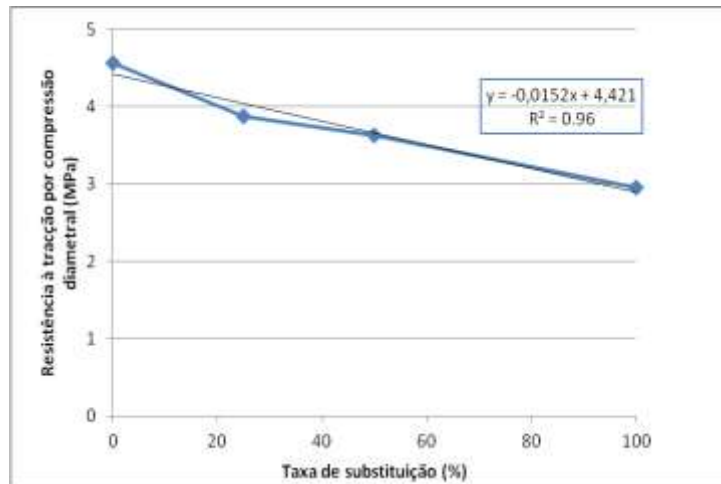


Figura 6. Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Segundo Coutinho e Gonçalves [35], esta propriedade não é tão afectada pela quantidade de cimento como a resistência à compressão.

Deste modo, a resistência à tracção não beneficia particularmente do cimento adicional que é incorporado juntamente com os AR (sobretudo com os AFRB). Portanto, é natural a ocorrência de maiores perdas de desempenho com a incorporação de AR, devido à estrutura mais porosa dos agregados reciclados.

Os valores obtidos estão de acordo com os de Khoshkenari et al. [26]. Neste estudo, observou-se uma diminuição de cerca de 26-32%, quando agregados naturais (finos e grossos) foram substituídos por agregados reciclados.

Verificou-se, igualmente, que a diminuição de resistência à tracção por compressão diametral foi mais acentuada do que a ocorrida na resistência à compressão.

É ainda possível detectar a maior influência dos AFRB no desempenho dos BAR. Deste modo, são visíveis diminuições de 14 e de 28%, em relação ao BR, caso a substituição integral ocorra nos AGN ou nos AFN, respectivamente. No que respeita à substituição de agregados finos naturais por AR, os resultados estão de acordo com os de Evangelista e Brito [22]. Os autores, para a taxa de incorporação de 100%, constataram reduções de aproximadamente 30%. Relativamente à incorporação de AGRB, os valores obtidos poderão ser validados através de Yang et al. [36], onde foram registadas diminuições de cerca de 14%.

#### 4.4 Módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado com base na especificação LNEC E-397 [37] aos 28 dias. No Quadro, são apresentados os resultados obtidos.

Quadro 8. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

Tipo de betão	Módulo de elasticidade (GPa)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	44,5	0,0	0,1
B 25/25	42,1	-5,4	1,4
B 50/50	38,3	-14,0	2,2
B 100/0	38,3	-14,0	2,0
B 0/100	40,4	-9,1	1,2
B 100/100	35,4	-20,5	0,6

Analisando os resultados, constata-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da incorporação de agregados reciclados (Figura 7). Nos betões PF, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, foram observadas reduções, em relação ao BR, de aproximadamente 5, 14 e 21%, respectivamente.

O pior desempenho dos BAR pode ser explicado pelo menor módulo de elasticidade dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais [38]. Por este motivo e pelo facto de o módulo de elasticidade do betão depender significativamente dos agregados [39], existe uma maior propensão para deformação dos BAR.

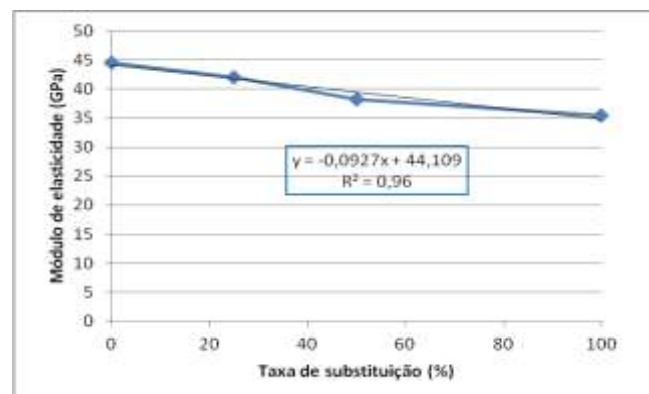


Figura 7. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Comparando os valores obtidos com os de Ajdukiewicz e Kliszczewicz [25], verifica-se uma proximidade acentuada entre ambos. Por exemplo, para a taxa de substituição de 100%, os autores observaram diminuições de 20-30%, em relação ao BR.

Finalmente, constata-se também que a fracção fina dos AR parece conduzir a maiores diminuições nesta propriedade. Nos betões em que apenas agregados grossos naturais (AGN) foram substituídos por agregados reciclados, foram verificadas reduções de 9,1%, em relação ao BR, enquanto nos betões integralmente produzidos com AFR as diminuições foram de 20,5%. Esta situação é justificada pelo facto de o módulo de elasticidade depender não só da rigidez dos agregados grossos mas também da rigidez da argamassa, da sua porosidade e da ligação entre ambos [35;39]. Como a incorporação de AFRB leva uma

redução significativa da rigidez da argamassa em face do aumento da relação a/c, tal afecta consideravelmente o módulo de elasticidade do betão.

#### 4.5 Velocidade de propagação de ultra-sons

A determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons realizou-se de acordo com a norma NP EN 12504-4 [40]. No Quadro 9 e na Figura 8, são apresentados os resultados obtidos.

Através da observação do Quadro 9 e da Figura 8, constata-se uma diminuição aproximadamente linear ( $R^2 = 0.98$ ;  $R^2 = 0.94$ ) da velocidade de propagação de ultra-sons com a taxa da incorporação de agregados reciclados. Esta situação é explicada pela maior porosidade dos BAR.

Quadro 9. Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Tipo de betão	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	5168,8	0,0	53,5
B 25/25	5018,0	-2,9	96,5
B 50/50	4923,6	-4,7	32,9
B 100/0	4795,8	-7,2	21,2
B 0/100	4978,3	-3,7	55,1
B 100/100	4746,3	-8,2	88,8

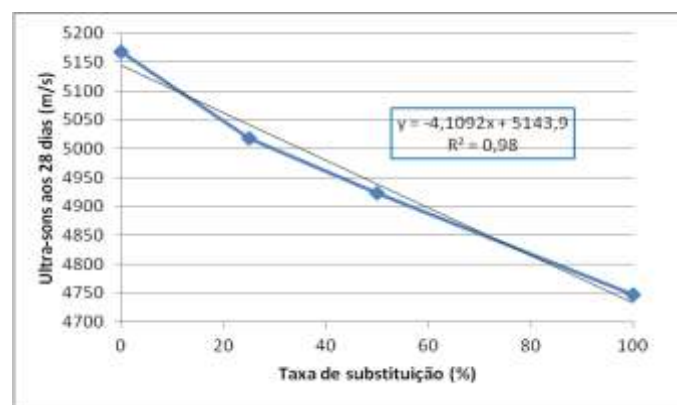


Figura 8. Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Deste modo, o BR registou a maior velocidade de propagação, cerca de 5169 m/s. Os BAR com agregados reciclados PF apresentaram valores de 4746-5018 m/s. As variações máximas do BAR PF, em relação ao BR, não excederam 9%.

Tal como nas restantes propriedades, a incorporação de finos reciclados é mais prejudicial ao desempenho dos BAR do que a de grossos reciclados, embora as diferenças não sejam tão significativas. Nos betões em que a totalidade dos agregados finos é substituída, observa-se uma diminuição de velocidade de propagação, em relação ao BR, de cerca de 7%. Na investigação conduzida por Pereira [41], foram verificados aumentos ligeiramente superiores (aproximadamente 15%). Por seu turno, os BAR com 100% de AGRB apresentam reduções de desempenho de 4%. Esta variação é semelhante à obtida por

Ismail e Ramli [42]. Os autores desse estudo registaram, para a máxima taxa de incorporação de AGRB, diminuições da velocidade de ultra-sons, em relação ao BR, de cerca de 6%.

#### 4.6 Resistência à abrasão

Este ensaio foi efectuado segundo a norma DIN 52108 [43]. No Quadro 10, são apresentados os resultados obtidos. Os betões que utilizaram AR da pré-fabricação apresentaram, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, diminuições de resistência à abrasão de aproximadamente 1, 10 e 33%, respectivamente.

Quadro 10. Resultados do ensaio de resistência à abrasão

Tipo de betão	Perda de espessura (%)	$\Delta_{\text{betão}}$	D.P
BR 0/0	3,4	0,0	0,1
B 25/25	3,4	0,8	0,1
B 50/50	3,7	9,6	0,1
B 100/0	4,7	40,4	0,2
B 0/100	2,9	-13,8	0,2
B 100/100	4,5	33,2	0,6

Através da observação da Figura 9, verifica-se uma diminuição aproximadamente linear ( $R^2 = 0,93$ ) desta propriedade com a taxa da incorporação de agregados reciclados.

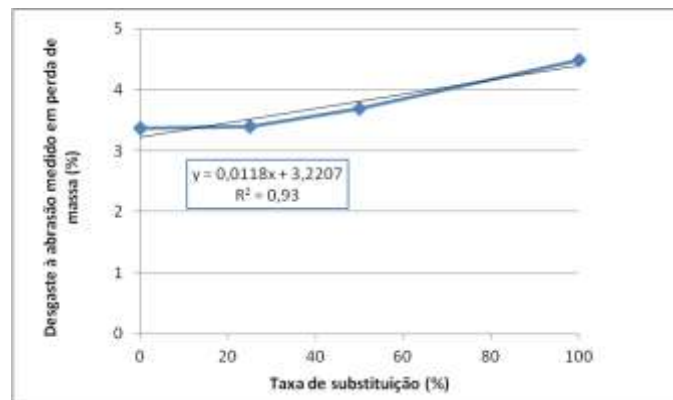


Figura 9. Resultados do ensaio de resistência à abrasão

Contudo, esta tendência parece verificar-se apenas a partir da taxa de substituição de 25%. O Quadro 10 permite ainda constatar que os BAR são mais sensíveis à incorporação de AFRB do que à de AGRB. Foram verificadas, nos betões reciclados, diminuições de resistência à abrasão de 40 %, em relação ao BR, quando a substituição ocorre nos agregados finos. Por outro lado, para o mesmo nível de substituição, os agregados grossos reciclados provocam aumentos de resistência de 14%. Deste modo, para pequenas incorporações, o efeito nefasto dos AFRB pode ser compensado pelos AGRB, explicando o valor obtido para a taxa de 25%. Os aumentos de desempenho observados com a introdução de agregados grossos reciclados podem ser explicados pela sua maior rugosidade, o que permite uma melhor

ligação entre eles e a matriz cimentícia. Deste modo, a resistência à abrasão que depende da dureza e rugosidade dos agregados grossos é melhorada [44]. Os resultados de Limbachiya et al. [45] mostram, igualmente, que é possível obter desempenhos idênticos utilizando um betão convencional ou um BAR com 100% de AGRB. Os autores verificaram diferenças entre um betão produzido com agregados naturais e betões com 100% AGRB de 0,03-0,04 mm. Por outro lado, os aumentos de relação água / cimento efectiva, observados nos betões com AFRB, bem como a maior porosidade destes agregados, justificam os piores resultados destes betões. Esta realidade é também corroborada por Evangelista e Brito [22]. Nessa investigação, para a incorporação de 100% de AFRB, foram observadas diminuições significativas de resistência à abrasão (cerca de 30%, relativamente ao BR).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas propriedades do estado fresco, nomeadamente no abaixamento, mostram que foi necessário aumentar a relação a/c dos BAR, para se atingirem trabalhabilidades idênticas. Esta situação deveu-se à maior absorção dos agregados reciclados, afectada pela presença de argamassa aderida. Os finos reciclados foram os mais prejudicados com valores 13 vezes superiores aos dos AFN. Relativamente aos AGRB, foram registados valores de absorção de água cerca de 6 vezes superiores aos dos AGN.

No que respeita à massa volúmica, verificou-se uma diminuição desta propriedade com a incorporação de AR. Foram obtidas variações máximas ente 5 e 9%, para os betões com 100% de agregados reciclados. Os resultados estão de acordo com os valores de massa volúmica dos agregados reciclados, cerca de 12% inferiores aos dos AN.

No que respeita ao estado endurecido, constatou-se uma diminuição de desempenho dos BAR, em relação ao BR, em todas as propriedades. Apesar disto, é importante salientar os valores extremamente satisfatórios obtidos em termos mecânicos. Por exemplo, na resistência à compressão (em cubos), aos 28 dias, verifica-se que até o BAR produzido apenas com agregados reciclados conseguiu atingir valores mais do que suficientes (cerca de 60 MPa), para poder ser utilizado na esmagadora maioria dos elementos estruturais. Situação análoga, foi verificada no módulo de elasticidade. De acordo com o Eurocódigo 2, os valores obtidos para o BAR com 100% de AR podem ser enquadrados em betões com classes de resistência C40/50. Na propriedade de tracção por compressão diametral, apesar das diminuições em relação ao BR terem sido mais significativas, continuou-se a registar valores muito próximos aos de betões C30/37.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do centro de investigação ICIST, do IST, da Universidade de Lisboa e da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).

## REFERÊNCIAS

- [1] Buck, A.D. - "Recycled concrete as a source of aggregate", *ACI Journal Proceedings*, 1977, Vol. 74, pp. 212-219.
- [2] Hansen, T.C. - "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", *RILEM Report No. 6*, E&FN Spon, London, 1992.
- [3] Malešev, M.; Radonjanin, V.; Marinkovic, S. - "Recycled concrete as aggregate for structural concrete production", *Sustainability*, 2010, Vol. 2, pp. 1204-1225.
- [4] Padmini, A.K.; Ramamurthy, K.; Mathews, M.S. - "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp. 829-36.
- [5] Kou, S.C.; Poon, C.S. - "Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 2010, Vol. 32, pp. 649-54.
- [6] Tam, V.W.Y.; Tam, C.M. - "Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach", *Journal of Materials Science*, 2007, Vol. 42, pp. 3592-602.
- [7] Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. - "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, 2004, Vol. 18, pp. 461-8.
- [8] Katz, A. - "Properties of concrete with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol. 33, pp. 703-711.
- [9] Amorim, P.; de Brito, J.; Evangelista, L. - "Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability", *ACI Materials Journal*, 2012, Vol. 109, pp. 195-204.
- [10] Berndt, M.L. - "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp. 2606-2613.
- [11] Pereira, P.; Evangelista, L.; de Brito, J. - "The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 28, pp. 722-9.
- [12] Pereira, P.; Evangelista, L.; de Brito, J. - "The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 2012, Vol. 9, pp. 1044-52.
- [13] Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L. - "Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete", *Construction and Building Materials*, Aceite para publicação, 2014.
- [14] Ferreira, L.; de Brito, J.; Barra, M. - "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete", *Magazine of Concrete Research*, 2011, Vol. 63, pp. 617-27.

- [15] Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L. - "Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste - Influence of the crushing process", *Materials and Structures*, Aceite para publicação, 2014.
- [16] Tsujino, M.; Noguchi, T.; Tamura, M.; Kanematsu, M.; Maruyama, I. - "Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2007, Vol. 5, pp. 13-25.
- [17] Tabsh, S.W.; Abdelfatah, A.S. - "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp. 1163-7.
- [18] Gonzalez, A.; Etxeberria, M. - "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 52, pp. 227-235.
- [19] P.C.A (Portland Cement Association) - "Recycled aggregate for reinforced concrete?", *Concrete Technology Today*, 2002, pp. 5-6.
- [20] Khatib, J. M. - "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, pp. 763-769.
- [21] Sim, J.; Park, C. - "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*, 2011, Vol. 31, pp. 2352-60.
- [22] Evangelista, L.; de Brito, J. - "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 2007, Vol. 29, pp. 397-401.
- [23] Ravindrarajah, R.S.; Loo, Y.H.; Tam, C.T. - "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete", *Magazine of Concrete Research*, 1987, Vol. 39, pp. 214-20.
- [24] Poon, C.S.; Kou, S.C.; Lam, L. - "Use of recycled aggregate in molded concrete bricks and blocks". *Construction and Building Materials*, 2002, Vol. 16, pp. 281-289.
- [25] Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A. - "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", *Cement and Concrete Composites*, 2002, Vol. 24, pp. 269-79.
- [26] Khoshkenari, A.G.; Shafigh, P.; Moghimi, M.; Mahmud, H.B. - "The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete", *Materials and Design*, 2014, Vol. 64, pp. 345-354.
- [27] Building Contractors Society of Japan - "Committee on disposal and reuse of construction waste", 1981.
- [28] Silva, R.V.; de Brito, J.; Dhir, R.K. - "Properties and composition of recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 65, pp. 201-217.
- [29] NP EN 12350-2 - "Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento", *IPQ*, Lisboa, 2009.

- [30] NP EN 12350-6 - “Ensaio do betão fresco: Massa volúmica”, *IPQ*, Lisboa, 2009.
- [31] NP EN 12390-3 - “Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”, *IPQ*, Lisboa, 2011.
- [32] Debieb, F.; Courard, L.; Kenai, S.; Degeimbre, R. - “Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 2010, Vol. 32, pp. 421–426.
- [33] Sagoe-Crentsil, K.; Taylor, A; Brown, T. - “Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste”, *Construction and Engineering, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)*, Melbourne, 1998.
- [34] NP EN 12390-6 - “Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes”, *IPQ*, Lisboa, 2011.
- [35] Coutinho, A.; Gonçalves, A. - “Fabrico e propriedades do betão”, Vol. I, II, III, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, 1997.
- [36] Yang, J.; Du, Q.; Bao, Y. - “Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks”, *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 25, pp. 1935-1945.
- [37] LNEC E-397 - “Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão”, *LNEC*, Lisboa, 1993.
- [38] Xiao, J.; Li, J.; Zhang, C. - “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading”, *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, pp. 1187-1194.
- [39] Neville, A.M. - “Properties of concrete”, *Pitman*, London, 1981, 844 p.
- [40] NP EN 12504-4 - “Ensaio do betão nas estruturas: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons”, *IPQ*, Lisboa, 2007.
- [41] Pereira, F. - “Betões estruturais com a incorporação de agregados finos reciclados de betão: Influência de superplastificantes”, *Instituto Superior Técnico*, Lisboa, 2010.
- [42] Ismail, S.; Ramli, M. - “Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates”, *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 68, pp. 726-739.
- [43] DIN 52108 - “Testing of inorganic non-metallic materials: wear test with the grinding wheel according to Boehme”. *DIN*, 2002.
- [44] Brito, J. - “Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões”, *Instituto Superior Técnico*, Lisboa, 2005.
- [45] Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; Dhir, R.K. - “Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete”, *Materials and Structures*, 2000, Vol. 33, pp. 574-80.