



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

**DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO**

**PROJECTO FCT  
PTDC / ECM / 118372 / 2010**



## Tarefa 2

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO (EXCELLentSUStainableCONCcrete)**

**ESTADO DA ARTE**

**RELATÓRIO**

Janeiro de 2014

Financiamento FCT/POCTI



Governo da República Portuguesa



União Europeia

FEDER

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE</b>	<b>1</b>
2.1. Agregados reciclados de betão	1
2.1.1. Métodos de trituração	1
2.1.2. Propriedades dos ARB	4
2.2. Propriedades de betões com agregados reciclados de betão	7
2.2.1. Resistência à compressão	7
2.2.2. Resistência à tracção por compressão diametral	14
2.2.3. Módulo de elasticidade	19
2.2.4. Absorção de água	24
2.2.5. Absorção de água capilaridade	27
2.2.6. Resistência à carbonatação	29
2.2.7. Resistência à penetração de cloretos	33
2.3. Propriedades de BED com agregados reciclados de betão	37
<b>3. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>41</b>
<b>4. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>44</b>

## Índice de figuras

Figura 1 - Evolução da resistência à compressão em diferentes investigações.....	8
Figura 2 - Resistência à compressão para diferentes tipos de cura.....	9
Figura 3 - Resistência à compressão para as misturas 1 e 2.....	10
Figura 4 - Resistência à compressão (Kwan et al., 2012) .....	11
Figura 5 - Resistência à compressão (Rao et al., 2011) .....	11
Figura 6 - Resistência à compressão (Khatib, 2005) .....	12
Figura 7 - Resistência à compressão (Sim e Park, 2011) .....	13
Figura 8 - Resistência à compressão (Evangelista, 2007).....	14
Figura 9 - Resistência à tracção por compressão diametral (Rao et al., 2011) .....	15
Figura 10 - Resistência à tracção compressão diametral (Tabsh e Abdelfatah, 2009) ...	15
Figura 11 - Resistência à tracção por compressão diametral (Yang et al., 2011) .....	16
Figura 12 - Resistência à tracção por compressão diametral (Etxeberria et al., 2007)...	16
Figura 13 - Resistência à tracção por compressão diametral (Leite, 2001) .....	17
Figura 14 - Resistência à tracção por compressão diametral (Solyman, 2005).....	18
Figura 15 - Resistência à tracção por compressão diametral (Evangelista, 2007) .....	19
Figura 16 - Módulo de elasticidade (Etxeberria et al., 2007).....	20
Figura 17 - Módulo de elasticidade (Rao et al., 2011).....	20
Figura 18 - Módulo de elasticidade (Xiao et al., 2005) .....	21
Figura 19 - Módulo de elasticidade (Khatib, 2005).....	22
Figura 20 - Módulo de elasticidade (Solyman, 2005).....	23
Figura 21 - Módulo de elasticidade (Evangelista, 2007) .....	23
Figura 22 - Absorção de água (Thomas et al., 2013).....	24
Figura 23 - Absorção de água (Rao et al., 2011).....	25
Figura 24 - Absorção de água (Levy et Helene, 2004) .....	25
Figura 25 - Absorção de água (Evangelista, 2010).....	26
Figura 26 - Absorção de água (Levy, 2001).....	27
Figura 27 - Absorção de água por capilaridade em diferentes investigações .....	28
Figura 28 - Absorção de água capilaridade (Zega e Di Maio, 2011).....	28
Figura 29 - Absorção de água capilaridade (Evangelista, 2010).....	29
Figura 30 - Resistência à carbonatação (Levy e Helene, 2004) .....	30
Figura 31 - Resistência à carbonatação (Kou e Poon, 2012).....	31
Figura 32 - Resistência à carbonatação (Limbachiya et al., 2012).....	31

Figura 33 - Resistência à carbonatação (Levy, 2001).....	32
Figura 34 - Resistência à carbonatação (Solyman, 2005) .....	33
Figura 35 - Resistência à carbonatação (Evangelista, 2010).....	33
Figura 36 - Influência da incorporação de AGRB (Rao et al., 2011).....	34
Figura 37 - Influência da incorporação de AGRB (Kou e Poon, 2012) .....	34
Figura 38 - Influência da incorporação de AGRB (Amorim et al., 2012) .....	35
Figura 39 - Resistência aos cloretos (Evangelista, 2010) .....	36
Figura 40 - Resistência aos cloretos (Levy, 2001) .....	36

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Diminuições de resistência à compressão devidas a AGRB em diferentes investigações.....	12
Tabela 2 - Diminuições de resistência à compressão devidas a AFRB em diferentes investigações.....	14
Tabela 3 – Diminuições de resistência à tracção por compressão diametral devidas a AGRB em diferentes investigações .....	17
Tabela 4 - Diminuições de resistência à tracção por compressão diametral devidas a AFRB em diferentes investigações.....	19
Tabela 5 - Diminuições de módulo de elasticidade devidas a AGRB em diferentes investigações.....	22
Tabela 6 - Diminuições de módulo de elasticidade devidas a AFRB em diferentes investigações.....	23
Tabela 7 - Aumentos de absorção de água devidos à incorporação de AGRB em diferentes investigações .....	26
Tabela 8 - Aumentos de absorção de água devidos à incorporação de AFRB em diferentes investigações .....	27
Tabela 9 - Aumentos de absorção de água por capilaridade devidos a AGRB em diferentes investigações .....	28
Tabela 10 - Aumentos de absorção de água capilaridade devidos a AFRB em diferentes investigações.....	29
Tabela 11 - Diminuições de resistência à carbonatação devidas a AGRB em diferentes investigações.....	31
Tabela 12 - Diminuições de resistência à carbonatação devidas a AFRB em diferentes investigações.....	33
Tabela 13 - Diminuições de resistência à penetração de cloretos devidas a AGRB em várias investigações .....	35
Tabela 14 - Diminuições de resistência à penetração de cloretos devidas a AFRB em várias investigações .....	37
Tabela 15 - Comparação entre propriedades de ARB de diferentes origens com AN ...	42
Tabela 16 - Influência da origem dos AR no desempenho de betões.....	42
Tabela 17 - Influência da TP+TS no desempenho de betões .....	42
Tabela 18 - Influência de ARB no desempenho de betões em diferentes investigações	43
Tabela 19 - Influência de ARB no desempenho de BED em diferentes investigações ..	44



## Abreviaturas

AFN	Agregados finos naturais
AFRB	Agregados finos reciclados de betão
AGN	Agregados grossos naturais
AGRB	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
ANTP	Agregados naturais sujeitos a trituração primária
ANTP+S	Agregados naturais sujeitos a trituração primária mais secundária
AR	Agregados reciclados
ARB	Agregados reciclados de betão
ARTP	Agregados reciclados sujeitos a trituração primária
ARTP+S	Agregados reciclados sujeitos a trituração primária mais secundária
BAFRB	Betões com agregados finos reciclados de betão
BAGRB	Betões com agregados grossos reciclados de betão
BAR	Betões com agregados reciclados
BARB	Betões com agregados reciclados de betão
BED	Betões de elevado desempenho
BER	Betões de elevada resistência
BO	Betão de origem
BR	Betão de referência, produzido sem agregados reciclados
Relação a/c	Relação água / cimento
TP	Trituração primária
TP+TS	Trituração primária mais secundária

## **1. Introdução**

Neste relatório, é apresentado um estado da arte sobre a incorporação de agregados reciclados (AR) em betão. Para tal, foi realizada uma recolha de informação em artigos internacionais e em publicações nacionais.

Deste modo, procurou-se aprofundar o conhecimento nas seguintes áreas: propriedades e métodos de trituração dos agregados reciclados de betão (ARB) e propriedades de betões convencionais e de elevado desempenho (BED) incorporando ARB.

Este tema é da maior relevância pois, a Sociedade exige cada vez mais que a indústria da construção adopte novas práticas e processos que minimizem os impactos negativos do sector sobre o meio ambiente. As preocupações relativas ao esgotamento de recursos naturais, ao elevado consumo de cimento (associado a elevados consumos energéticos e emissões de dióxido de carbono) e aos denominados resíduos da construção e demolição (RCD) têm estado, nestes dias, na agenda dos países desenvolvidos.

Finalmente, o presente documento dá cumprimento ao estabelecido com a FCT, no âmbito de projectos de investigação científica e de desenvolvimento tecnológico, que requer a apresentação de relatórios periódicos.

## **2. Estado da arte**

Neste capítulo, serão abordados três conceitos distintos: agregados reciclados de betão, betões convencionais e betões de elevado desempenho que, na sua composição, procederam à substituição de agregados naturais (AN) por ARB.

Regista-se a existência de resultados contraditórios nas diferentes investigações, situação que mostra que a influência e variabilidade dos ARB no desempenho dos betões.

### **2.1. Agregados reciclados de betão**

#### **2.1.1. Métodos de trituração**

No levantamento bibliográfico efectuado, constatou-se que a maioria dos estudos sobre betões com agregados reciclados (BAR) ou não referia o método de britagem ou utilizava apenas um único estágio de trituração.

No entanto, caso se pretenda uma abordagem mais rigorosa na determinação do desempenho de BAR, é preciso esclarecer possíveis mudanças associadas ao método de trituração.



A indústria de extração de agregados selecciona o método de trituração em função do tipo de rocha, taxa de produção, redução de tamanho e forma pretendida. Para isso, utiliza britadores que trituram mecanicamente a rocha, dando origem a fragmentos progressivamente menores. A redução de tamanho é conseguida, geralmente, através de várias etapas de trituração, uma vez que, existem limites práticos à redução de tamanho. Relativamente aos britadores utilizados, destacam-se: britador de maxilas; britador giratório; britador de impacto e britador de cone.

Um britador de maxilas é normalmente utilizado como britador primário. É constituído por um conjunto de maxilas verticais, sendo uma maxila fixa e a outra móvel. A compressão progressiva do movimento de “vai-e-vem” da maxila móvel fragmenta a rocha. Os britadores giratórios são ideais para britagem primária de alta capacidade. Um britador giratório apresenta cones verticais internos e externos de esmagamento, estando o cone exterior orientado com a sua extremidade larga para cima e o cone interior invertido em relação ao exterior, com o seu vértice para cima. Estes trituradores fornecem um produto de dimensões uniformes.

Os britadores de impacto são normalmente utilizados nas etapas de britagem primária e secundária, sendo mais adaptados para rochas mais macias. Contudo, tendem a desgastar-se mais rapidamente do que os outros devido à constante colisão de alta velocidade com a rocha.

Finalmente, os britadores de cone são utilizados para triturações secundárias e terciárias. São um tipo de britadores giratórios, estando bem adaptados para aplicações que requerem uma relação de redução de 6:1.

No que respeita, à trituração de betão, Nagatakia et al. (2004), utilizando britadores de maxilas e de impacto, obtiveram um índice de recuperação de agregado grossos de 0.6, ou seja, por cada tonelada de betão de origem triturado foram produzidos 400 kg de finos de betão. Contudo, para um processamento adicional (material triturado mais duas vezes com um equipamento mecânico), apesar de a argamassa aderida ter sido minimizada, a taxa de recuperação da fracção grossa diminuiu até 35%. O estudo refere ainda que a indústria japonesa está a desenvolver um sistema de reciclagem em sistema fechado para lidar com a grande quantidade de finos e pó de betão triturado para a produção de cimento reciclado.

Neste estudo, quanto às propriedades dos agregados grossos reciclados de betão (AGRB), observou-se que estas são claramente condicionadas pelo método de britagem. Verificou-se que o processamento adicional originou agregados reciclados de melhor qualidade.

Segundo os investigadores, desempenhos mecânicos e relações de porosidade invulgares de betões incorporando agregados reciclados podem ser facilmente explicados por mudanças registadas no perfil microestrutural dos agregados presentes no betão de origem (BO), devido ao processo de trituração.

Constata-se ainda que o comportamento elástico compatível do sistema constituído por AGRB e pela matriz de cimento circundante é também outra importante razão para um bom desempenho mecânico de betão reciclado.

No estudo de Matias et al. (2013), foram também realizados ensaios, de forma a compreender como é que o processo de trituração dos agregados naturais e reciclados influencia as propriedades do betão.

Os resultados mostram que a forma dos agregados e o método de trituração estão intimamente ligados. Os agregados do tipo 1 (TP), produzidos com um britador de maxilas (trituração primária), apresentam valores de índice de forma inferiores aos agregados do tipo 2 (TP+TS) que, também usaram um britador de impacto (trituração secundária). Verifica-se que os agregados tipo 1 são mais angulosos e os de tipo 2 têm uma forma mais arredondada. Contudo, as diferenças encontradas nos valores desta propriedade não são significativas (cerca de 8%). Em relação às diferenças entre agregados naturais e agregados reciclados, constata-se que os AR possuem uma forma mais arredondada do que os AN (valores de índice de forma ligeiramente mais elevados para todos os tamanhos de partículas e em ambos os processos), sendo os resultados justificados pela argamassa aderida aos reciclados.

Comparando a massa volúmica aparente de AN (ANTP *versus* ANTP+S) e AR (ARTP *versus* ARTP+S), a trituração primária e secundária melhora, de forma indirecta, a qualidade do betão, ainda que por uma pequena margem, devido à forma mais arredondada dos agregados. O uso de partículas angulares / alongadas requer maior pasta de cimento, por causa de um índice de vazios superior e também um aumento da procura de água para manter a trabalhabilidade do betão. Além disso, as partículas achatadas podem ser estratificadas, enfraquecendo a resistência e a durabilidade do betão, ao passo que o uso de agregados arredondados / cúbicos limita estes problemas.

Nos que respeita às propriedades mecânicas, nomeadamente na resistência à compressão, não são visíveis diferenças entre betões utilizando agregados reciclados sujeitos a TP ou TP+TS. Foram obtidos valores de 50 e 51 MPa para os betões utilizando ARTP e ARTP+S, respectivamente.

### 2.1.2. Propriedades dos ARB

Para se conseguir promover a utilização de agregados reciclados de betão na indústria da construção, é essencial estabelecer as propriedades mecânicas e de durabilidade dos AR que, permitam o seu uso de forma efectiva.

As propriedades do betão com agregados reciclados são influenciadas pela qualidade do betão a partir do qual os agregados são gerados. Verifica-se que a qualidade e a quantidade de argamassa aderida à superfície dos AR influenciam decisivamente as suas propriedades.

A qualidade da argamassa aderida depende da relação a/c utilizada no betão de origem e a sua quantidade depende da resistência dos betões e do processo de trituração utilizado (Hansen et Boegh,1985; Hansen et Narud,1983).

Constata-se que, na microestrutura do betão, a zona de interface situada na região entre o agregado e a argamassa circundante apresenta uma importância considerável, uma vez que é responsável por regular as propriedades de resistência mecânica (Alexander et Mindess, 2005).

Assim, o pior desempenho do BAR está, muitas vezes, associado a fissuras que se formaram nos agregados reciclados durante o seu processamento, tornando o agregado mais fraco e susceptível à penetração, difusão e absorção de fluidos (Olorunsogo et Padayachee, 2002).

Deste modo, a absorção de água e a densidade dos agregados reciclados são também afetadas pela argamassa de cimento aderida (Hansen et Narud,1983).

Quando a absorção de água de agregados grossos e finos reciclados ultrapassa 7% e 13%, respectivamente, estes não devem ser utilizados na produção de betão (Building Contractors Society of Japan, 1981).

Verifica-se ainda que, para serem atingidos níveis semelhantes de abaixamento, os betões incorporando areia natural e 100% de AGRB necessitam de cerca de 5% a mais de água livre do que o betão convencional. Quando são utilizados agregados finos e grossos em simultâneo, o acréscimo de água sobe para 15% (Building Contractors Society of Japan, 1981).

Realizado este enquadramento geral, segue-se uma análise de maior detalhe de algumas propriedades dos agregados reciclados: absorção da água; massa volúmica, baridade e forma das partículas.

No que respeita à absorção de água, devido à quantidade residual de argamassa aderida, os valores que se obtêm são superiores aos dos agregados naturais. Esta realidade con-

duz geralmente a maiores relações a/c. A quantidade de água absorvida pelos agregados reciclados depende dos seguintes factores: humidade inicial dos agregados; tempo de contacto do material com a água e tipo de mistura, isto é, se o agregado entra em contacto primeiro com a água ou com a pasta de cimento (Barra, 1996). Neste estudo, refere-se ainda que a absorção de água nestes agregados não ocorre uniformemente, dando-se principalmente na zona de contacto entre a pasta e o agregado. Assim, quanto mais seco, poroso e de menor dimensão for o agregado e quanto maior for a fluidez da pasta, maior será a quantidade de água absorvida.

Além da elevada absorção de água registada nos ARB, verifica-se que esta ocorre nos instantes iniciais. No trabalho desenvolvido por Leite (2001), observa-se que mais de 50% da água é absorvida nos primeiros 30 minutos, tanto para finos como para grossos reciclados de betão. Por outro lado, no estudo de Mellman et al. (1999), refere-se que 70 a 95% da absorção de água dos agregados reciclados ocorre durante os primeiros 10 minutos de imersão.

Os valores de absorção para agregados grossos reciclados de betão encontram-se entre 5,8 e 16,8% (Barra e Vazquez, 1998; Ferreira et al. 2011; Gomes, 2007; Hasaba et al. 1981; Movassaghi, 2006). No que concerne aos finos, esse intervalo situa-se entre 8,5 e 14% (Zega e Di Maio, 2011; Pereira et al. 2011; Kou e Poon, 2009; Evangelista, 2010; Solyman, 2005).

De modo a evitar que a relação a/c dos betões com agregados reciclados de betão (BARB) seja afectada, é possível recorrer-se à pré-saturação dos AR ou adicionar uma quantidade extra de água durante a amassadura, compensando deste modo a que será absorvida pelos ARB.

Por exemplo, Ferreira et al. (2011) realizaram um estudo sobre a influência da pré-saturação dos AGRB, comparando-a com o método de compensação de água de amassadura. Ao analisar a evolução da absorção de água ao longo do tempo, constataram que 70% da absorção potencial de água dos AGRB ocorria no primeiro minuto, sendo atingindo o valor de 90% após 5 minutos. Os mesmos autores concluíram ainda que a pré-saturação dos AGRB foi prejudicial para o desempenho mecânico do betão e, em especial, o desempenho de durabilidade, sendo por isso preferível proceder-se à compensação de água durante a amassadura, como forma de controlar os efeitos da elevada absorção de água dos AGRB.

Relativamente à massa volúmica e baridade, verifica-se que os valores obtidos para agregados reciclados são menores do que os dos agregados naturais. Esta realidade deve-se à argamassa que se encontra aderida aos AR de betão, que possui uma porosi-

dade superior aos naturais (Hansen, 1992). Segundo Brito (2005), quanto maior a massa volúmica, tanto das partículas como do seu conjunto (baridade), melhor será o desempenho do betão, concluindo-se assim que, nesta propriedade, os reciclados de betão são um material pior do que os agregados naturais.

Os estudos desenvolvidos por Ferreira et al. (2011) e Gomes (2007) relatam diminuições de massa volúmica dos AGRB, em relação aos AN, de 9% e 3%, respectivamente. No que respeita à baridade as variações foram de 20% e 15% respectivamente. Em termos absolutos, os valores de massa volúmica dos AR situaram-se nesses estudos entre 2440 e 2530 kg/m<sup>3</sup>, enquanto a baridade variou entre 1140 e 1300 kg/m<sup>3</sup>.

No que concerne aos agregados finos reciclados de betão (AFRB), Levy (2001) registou uma baridade de 1340 kg/m<sup>3</sup>. Este valor, inferior a 1375 kg/m<sup>3</sup> dos agregados finos naturais (AFN), está também de acordo com os pressupostos assumidos, ou seja, a argamassa aderida aos agregados, de massa volúmica aparente (baridade) inferior, provoca uma descida da massa volúmica aparente dos AFRB.

De igual modo, Leite (2001) constatou que a massa volúmica dos AFRB é cerca de 4% inferior à dos AFN.

No trabalho realizado por Solyman (2005), observa-se que a massa volúmica dos diferentes tipos de agregados reciclados variou entre 2107 e 2635 kg/m<sup>3</sup>. O investigador justificou os resultados através da diferença de porosidades entre os tipos de agregados, sendo que esta diferença foi novamente explicada pela quantidade residual de argamassa aderida aos AFRB.

Evangelista (2007) refere que os AFRB possuem pior desempenho, devido à sua elevada porosidade. Esta situação é comprovada pelo facto de a massa volúmica do material impermeável, que não tem em atenção a porosidade aberta, ser praticamente igual entre os AFN e os AFRB, ao contrário do que sucede nas restantes massas volúmicas, que apresentam valores muito diferentes para os dois materiais. O estudo obteve para AFRB valores de 2165 kg/m<sup>3</sup> para a massa volúmica saturada com superfície seca e de 1234 kg/m<sup>3</sup> para a baridade.

Finalmente, surge a forma das partículas, que segundo Coutinho e Gonçalves (1997), exerce uma grande influência na produção dos betões, nomeadamente no que diz respeito a aspectos de trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e quantidade de água de amassadura necessária.

Partículas mais arredondadas, isto é, menos angulosas originam um ângulo de atrito interno do betão inferior, o que conduz a uma melhor trabalhabilidade e melhor compa-

cidade da mistura (Coutinho et Gonçalves, 1997). Deste modo, o processo de obtenção dos agregados adquire uma importância fulcral na forma das partículas.

Os AGRB apresentam usualmente uma superfície mais rugosa e um formato mais alongado do que os agregados grossos naturais (AGN) que lhes deram origem (Brito, 2005; Gonçalves et al., 2001).

No estudo de Kikuchi et al. (1998), refere-se que betões com relações a/c elevadas originam AR de formato mais arredondado. Tal facto justifica-se pela menor resistência do betão de origem, que deste modo permite um maior desgaste e erosão dos AGRB.

Leite (2001) analisou microscopicamente a forma dos agregados finos reciclados de betão, de modo a estudar em pormenor as zonas de interacção agregado / pasta. A autora observou uma grande diferença entre as zonas de ligação pasta / agregado, para os AR e os AN, sendo que nestes últimos não há qualquer tipo de ligação da pasta com a superfície dos AN.

Constatou ainda que existem maiores interfaces de ligação pasta / agregado com a inclusão de AFRB, o que poderá explicar alguns resultados em que se observa um melhor desempenho dos betões com agregados finos reciclados de betão (BAFRB) em comparação com os betões de referência (BR). No BR, é possível distinguir de forma clara a pasta e o agregado, ao contrário do que acontece no BAR, em que a matriz e a zona de transição se confundem. A investigadora refere também que a formação de produtos de hidratação na superfície porosa e rugosa dos AR devido à absorção da pasta de cimento contribui para aumentar a aderência pasta / agregado.

A investigação conduzida por Solyman (2005) dá ênfase ao modo de processamento dos materiais demolidos, como um dos aspectos que mais influencia a textura dos AR. O investigador procedeu na sua investigação a uma análise microscópica através de um *scanner* electrónico aos AFN e aos AFRB, confirmando também a superfície mais áspera e a forma mais achatada dos AFRB quando em comparação com os AFN.

## **2.2. Propriedades de betões com agregados reciclados de betão**

### **2.2.1. Resistência à compressão**

A incorporação de agregados grossos reciclados de betão é responsável por uma diminuição de desempenho na propriedade de resistência à compressão. Esta realidade deve-se ao aumento da relação a/c, causada pela elevada absorção do material reciclado e pela sua forma achatada e angulosa. Deste modo, para se obterem trabalhabilidades idênticas, o

betão reciclado exige maiores quantidades de água. Na análise desta propriedade, serão considerados os seguintes aspectos: desenvolvimento da resistência ao longo do tempo; influência das condições de cura; influência do betão de origem e taxa máxima de substituição.

Na Figura 1, são apresentados os resultados obtidos por Kwan et al. (2012) e Rao et al. (2011), relativos à evolução da resistência ao longo do tempo. Constatou-se que, em Kwan et al. (2012), o betão de referência atingiu a resistência mais cedo do que o betão com agregado reciclado (com uma taxa de substituição de 80% de AGN por AGRB), aumentando apenas 5% nos últimos 21 dias de 28 de cura. O betão com agregado reciclado registou um aumento de 28%. No estudo de Rao et al. (2011), observou-se uma tendência contrária, com o betão incorporando 100% de agregados reciclados grossos a atingir primeiro a resistência com um aumento de 31% dos 7 para 28 dias. No betão de referência, o aumento foi de 70%. Em ambos os estudos, constata-se uma evolução de resistência idêntica para os BAR. De referir que, em termos de composição dos betões, estes dois trabalhos apenas diferem na introdução de superplastificante em Rao et al. (2011) (variou entre 0,05 e 0,225 da massa de cimento).

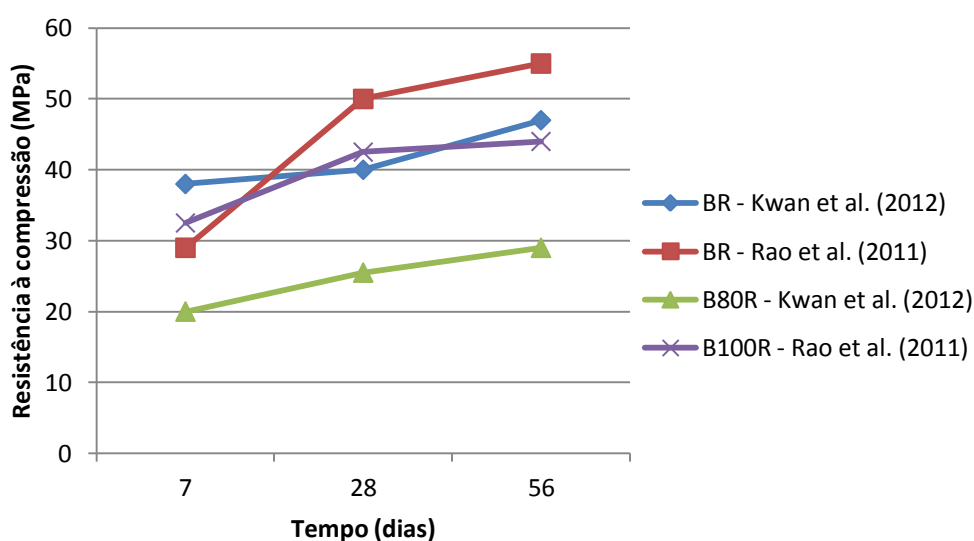


Figura 1 - Evolução da resistência à compressão em diferentes investigações

Aos 28 dias, os betões de referência de ambas as investigações têm um comportamento semelhante com aumentos de cerca de 18%. Quanto aos BARB, verifica-se um incremento de resistência de 17% e 5% em Kwan et al. (2012) e Rao (2011), respectivamente.

Em Etxeberria et al. (2007) e Salem e Burdette (1998), é relatado que o aumento na resistência à compressão em idade precoce de betões com AR é principalmente devido à elevada capacidade de absorção da argamassa aderida aos agregados reciclados e à tex-

tura áspera dos mesmos que proporcionam uma melhoria das características de ligação. Na investigação realizada por Rao et al. (2011), foi estudada a variação da resistência à compressão de betão reciclado para diferentes condições de cura. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.

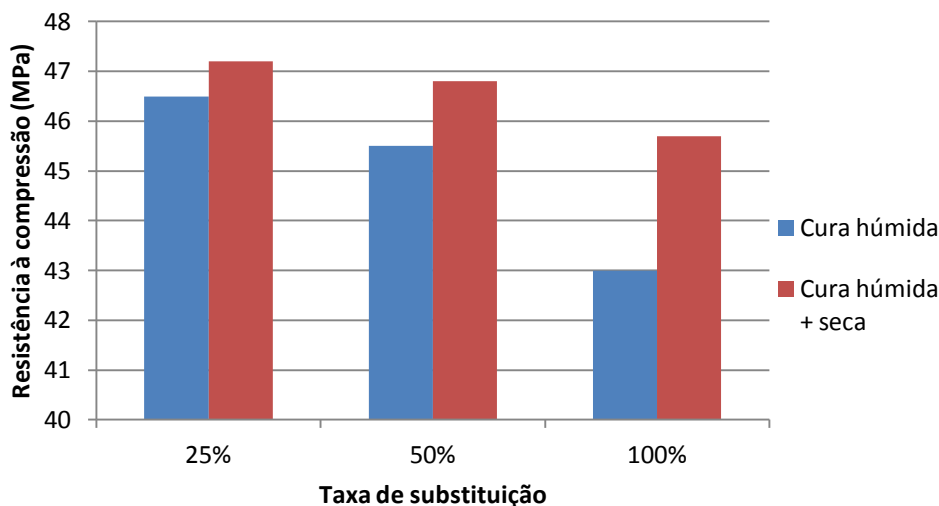


Figura 2 - Resistência à compressão para diferentes tipos de cura (Rao et al. 2011)

Os resultados mostram que os betões sujeitos a uma cura seca (após 7 dias de cura húmida) evidenciam uma melhor resistência do que os betões sujeitos apenas a cura húmida. Esta conclusão é válida para todas as taxas de substituição. É possível observar, para a taxa de incorporação de 100%, um aumento de cerca de 6% no betão sujeito a cura húmida + seca. Este resultado é explicado pelo facto de, em condições de cura húmida parcial, a qualidade da antiga zona de transição interfacial (ITZ) poder melhorar, devido à maior capacidade de absorção da sua argamassa que adere aos agregados reciclados. No caso de cura húmida contínua, devido às mesmas características da argamassa antiga, poderá haver um aumento de água livre na velha ITZ conduzindo a uma zona de transição mais fraca. Conclusões idênticas foram obtidas em Bartlett et Macgregor (1994).

No estudo de Poon et al. (2004), observou-se que as condições de humidade dos agregados influenciam a resistência dos futuros betões. Deste modo, verificou-se que a resistência à compressão de betão produzido com agregados reciclados secos era maior do que a de betões utilizando agregados saturados com superfície seca, devido à melhoria de qualidade da antiga ITZ.

No que respeita à influência do betão de origem nos desempenhos dos futuros betões, é analisado o trabalho de Tabsh e Abdelfatah (2009). Nesta investigação, estudou-se a influência da incorporação de agregados reciclados provenientes de betões com resistências conhecidas e desconhecidas. Para tal, foram produzidas duas misturas distintas: uma com



baixa resistência alvo (30 MPa) e outra com resistência alvo moderada (50 MPa). Na Figura 3, são apresentados os resultados obtidos para a mistura 1 (30MPa) e mistura 2 (50 MPa).

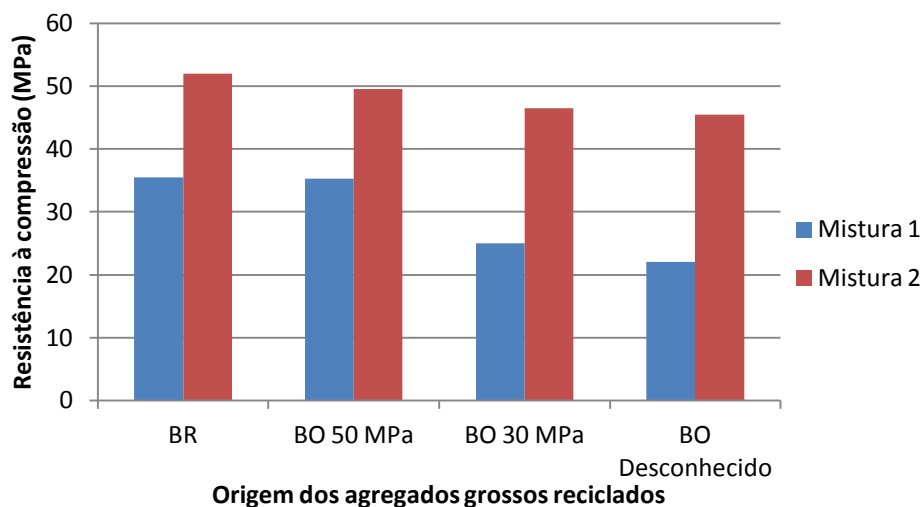


Figura 3 - Resistência à compressão para as misturas 1 e 2 (Tabsh e Abdelfatah, 2009)

Através da Figura 3, verifica-se que, para a mistura 1, a resistência do betão produzido com agregados reciclados com origem em betão de 50 MPa foi idêntica à do betão de referência. No entanto, os betões com AR de resistência fraca e desconhecida obtiveram menores desempenhos. Consta-se que o betão com agregados reciclados provenientes do BO 30 MPa registou uma perda de resistência de 30%. A perda correspondente de resistência é de cerca de 40% quando se utilizou AR de fonte desconhecida.

Para a mistura 2, observa-se um padrão similar. Deste modo, a diminuição de resistência para o betão com AR provenientes do BO 30 MPa é de 10%, enquanto para os agregados de fonte desconhecida essa diminuição é de aproximadamente 15%.

As diferentes resistências das duas misturas foram obtidas através da incorporação de cimento extra, mantendo a mesma quantidade de agregados grossos. Assim, os investigadores concluíram que, se a quantidade de agregados grossos foi igual nas duas misturas, a perda de resistência devida ao uso de AR é mais significativa na mistura mais fraca do que na mais forte. Esta explicação decorre de a resistência do betão ser dependente tanto dos agregados grossos como do cimento e, por conseguinte, se é utilizado mais cimento, então o efeito do agregado grosso é diminuído.

Nesta investigação, conclui-se também que a utilização de agregados grossos reciclados de betão provenientes de um BO 50 MPa não provoca diminuições de resistência relativamente a um betão de referência constituído apenas por agregados naturais.

Relativamente à taxa máxima de substituição, alguns autores, devido às diferenças significativas dos valores de diminuição de resistência registadas em diversos estudos,

propõem uma incorporação máxima de agregados grossos reciclados. Estas diferenças mostram a influência de vários factores no desempenho dos betões, tais como a origem dos agregados naturais analisada anteriormente.

No estudo de Kwan et al. (2012) (Figura 4), verifica-se uma diminuição nesta propriedade com a substituição parcial de AN por agregados reciclados. Observam-se diminuições de aproximadamente 4, 8, 28 e 30% para taxas de incorporação de 15, 30, 60 e 80%, respectivamente. Estes resultados foram justificados pela má qualidade da argamassa aderida, responsável pela criação de zonas de fraqueza no betão.

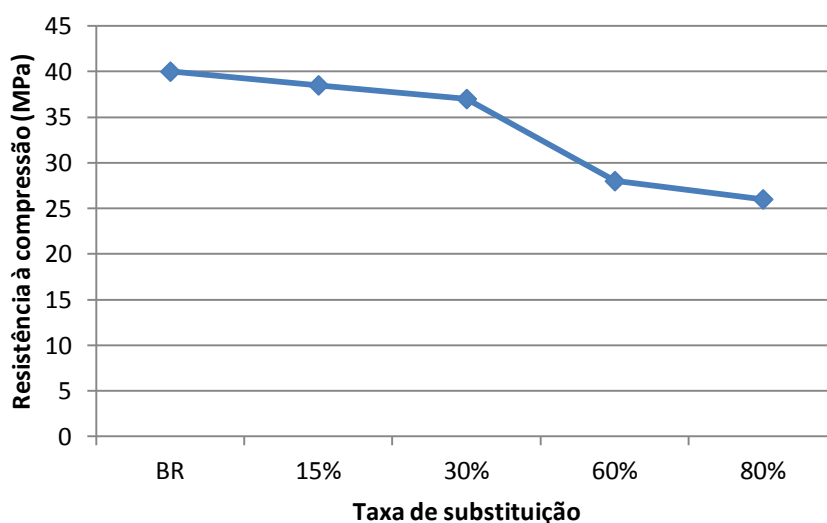


Figura 4 - Resistência à compressão (Kwan et al., 2012)

Por outro lado, na Figura 5, verifica-se que, no estudo de Rao et al. (2011), não existiu uma variação significativa de resistência (cerca de 13%) entre o betão de referência e o betão com 100% de agregados grossos reciclados.

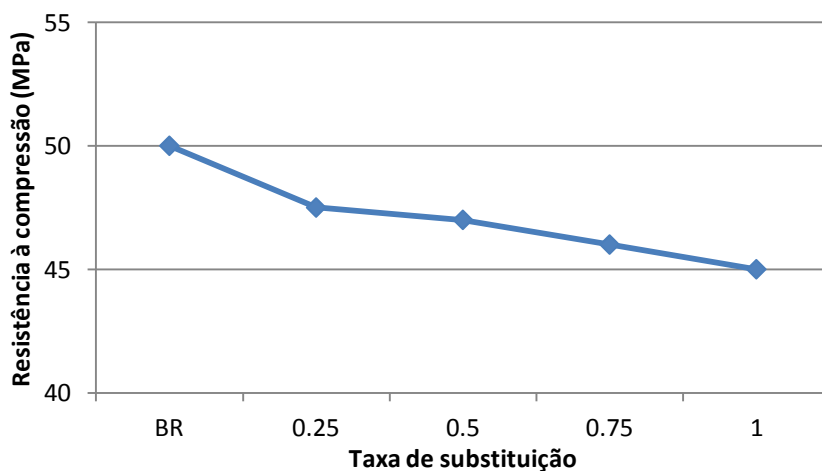


Figura 5 - Resistência à compressão (Rao et al., 2011)

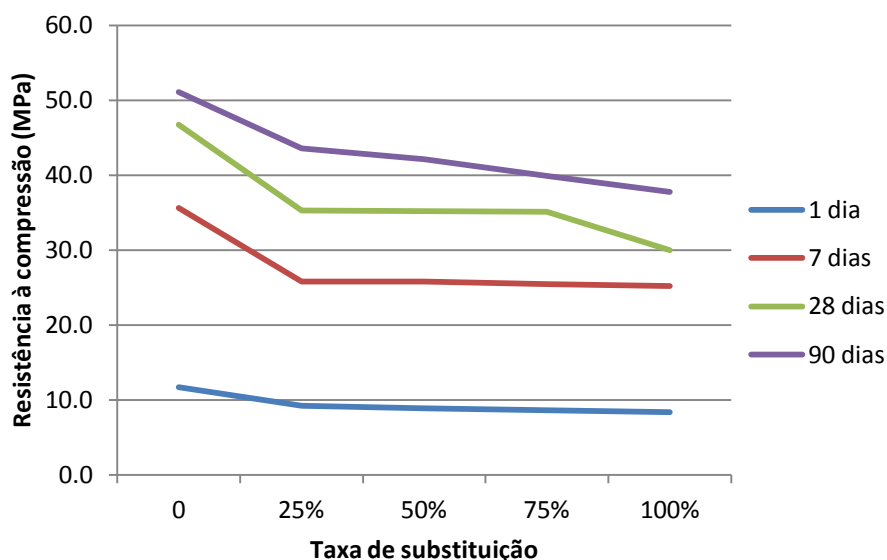
Assim, através das investigações citadas, verifica-se que, para a mesma taxa de incorporação de AGRB, podem existir diminuições de resistência de 10 a 30%. Deste modo, confirma-se que o desempenho dos BARB é muito condicionado pelas características dos agregados reciclados. Na Tabela 1, são apresentadas diminuições de resistência à compressão obtidas noutros estudos, em betões incorporando 100% de agregados grossos reciclados. Os resultados mostram que as perdas ocorridas se situam, aproximadamente, dentro do mesmo intervalo.

**Tabela 1 - Diminuições de resistência à compressão devidas a AGRB em diferentes investigações**

Autor	Diminuição de resistência (%)
Ravindrarajah e Tam (1985)	8-24
Bairagi et al. (1993)	6-16
Poon et al. (2004)	15
Rahal (2007)	10
Etxeberria et al. (2007)	20-25

Relativamente à incorporação de agregados finos reciclados de betão (AFRB), constata-se igualmente uma diminuição de desempenho nesta propriedade.

Assim, no trabalho realizado por Khatib (2005), constatou-se uma diminuição de resistência à compressão, nos betões com agregados finos reciclados de betão (BAFRB) comparativamente aos BR (Figura 6).



**Figura 6 - Resistência à compressão (Khatib, 2005)**

Nos primeiros 7 dias, a taxa de incorporação de AFRB foi indiferente, sendo que todos os BAFRB apresentaram perdas idênticas. Aos 28 dias de cura, a resistência à compressão dos BAFRB foi similar nas taxas de substituição de 25 a 75%, ao invés do betão com 100% de substituição, em que o seu valor foi bastante inferior. Aos 90 dias, houve redu-

ções entre 15%, para o B25R, e 27%, para o B100R. Devido à diminuição da variação ao longo do tempo (em relação ao BR), os investigadores concluíram que os BAFRB necessitam de mais tempo para adquirir resistência.

Na Figura 7, são apresentados os resultados obtidos por Sim e Park (2011). Verifica-se uma diminuição de resistência à compressão com o aumento da incorporação de AFRB, sendo que, para a máxima taxa de substituição (100%), se regista uma perda de 30% em relação ao betão de referência.

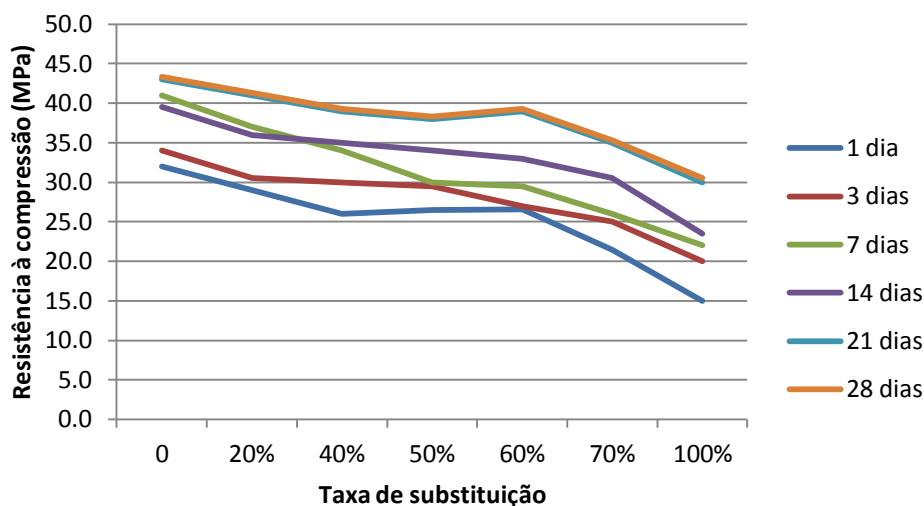


Figura 7 - Resistência à compressão (Sim e Park, 2011)

Os resultados são justificados pelos investigadores pela presença de impurezas, argamassa aderida e pela 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 nesta propriedade.

Na investigação de Evangelista (2007), obtêm-se diminuições menos significativas devido à presença de AFRB (Figura 8). Deste modo, registam-se perdas de resistência, aos 28 dias, de 4 e 8% para as taxas de substituição de 30 e 100%, respectivamente.

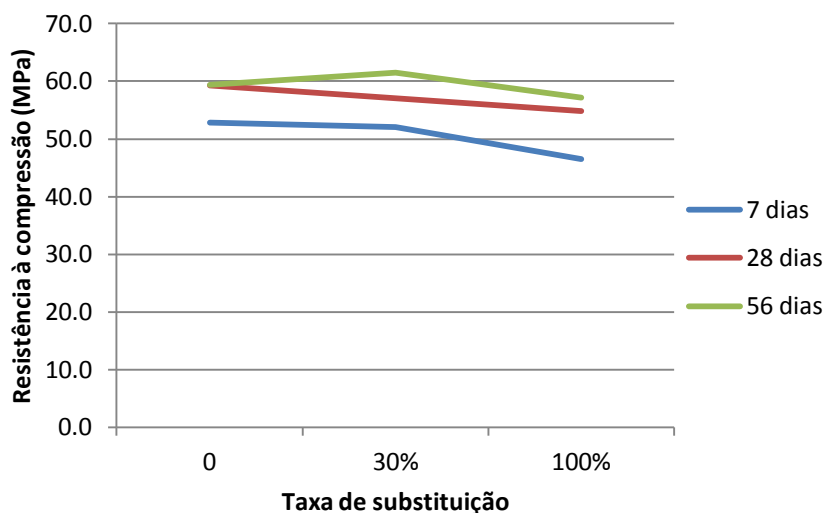


Figura 8 - Resistência à compressão (Evangelista, 2007)

O investigador justificou os resultados com o aumento da quantidade absoluta de cimento com o aumento da taxa de substituição de AFRB, o que poderá compensar a sua maior porosidade.

Na Tabela 2, são apresentadas diminuições de resistência à compressão aos 28 dias, nos estudos analisados.

Tabela 2 - Diminuições de resistência à compressão devidas a AFRB em diferentes investigações

Autor	Diminuição de resistência (%)
Khatib (2005)	35
Sim e Park (2011)	30
Evangelista (2007)	8

### 2.2.2. Resistência à tracção por compressão diametral

Relativamente à tracção por compressão diametral, verifica-se também uma diminuição nesta propriedade com a substituição de AN por agregados grossos reciclados.

No trabalho de Rao et al. (2011), observou-se que a rotura ocorreu na interface entre o agregado e a argamassa aderida, contrariamente ao que sucede geralmente no betão de referência em que a interface entre o agregado reciclado e a nova argamassa é a parte mais fraca. Verifica-se uma diminuição nesta propriedade de 13, 23 e 24% para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, respectivamente (Figura 9).

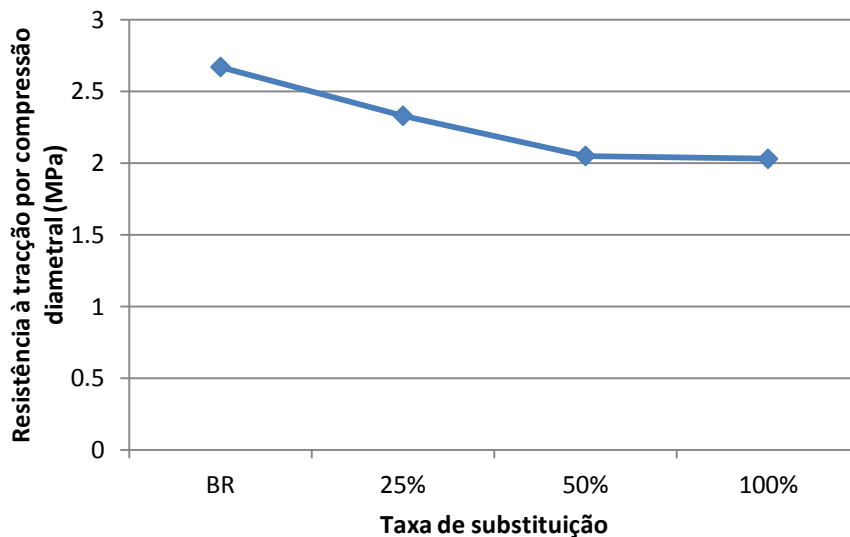


Figura 9 - Resistência à tração por compressão diametral (Rao et al., 2011)

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral na investigação conduzida por Tabsh et Abdelfatah (2009) são apresentados na Figura 10.

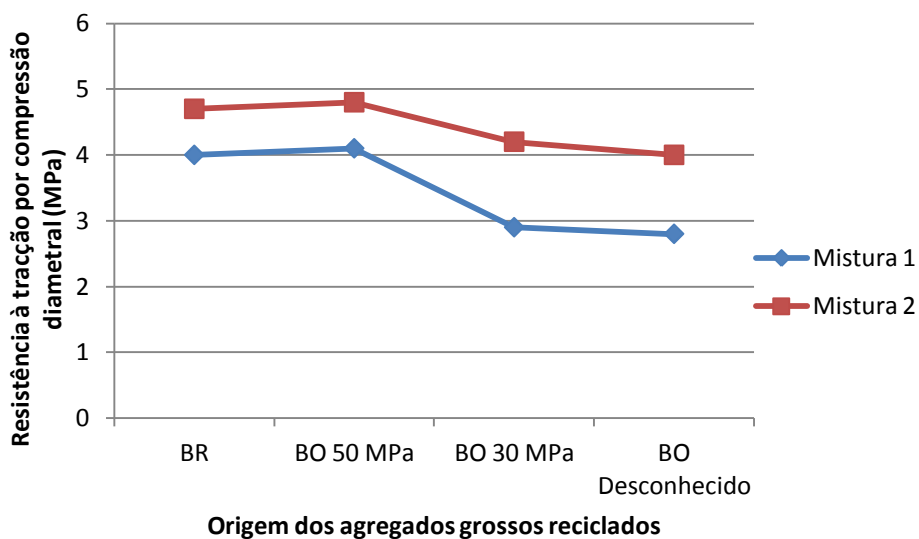


Figura 10 - Resistência à tração por compressão diametral (Tabsh et Abdelfatah, 2009)

Os valores obtidos para a mistura 1 (30 MPa) indicam que o betão feito com agregados grossos reciclados de 50 MPa é tão resistente como o betão correspondente produzido com agregados grossos naturais. No entanto, foi registada uma diminuição de 25% no betão com AR de 30 MPa e de 30% no betão com agregados reciclados de fonte desconhecida.

No que respeita à mistura 2, observa-se uma tendência semelhante, embora com menores diminuições de resistência. O betão com AR de 50 MPa apresentou uma resistência idêntica ao betão de referência, enquanto os betões com agregados de 30 MPa e de origem desconhecida sofreram perdas de 10% e 15%, respectivamente.

Na Figura 11, são apresentados os resultados obtidos em Yang et al. (2011), para o betão de referência e para o betão em que os AGN foram substitutos por AGRB.

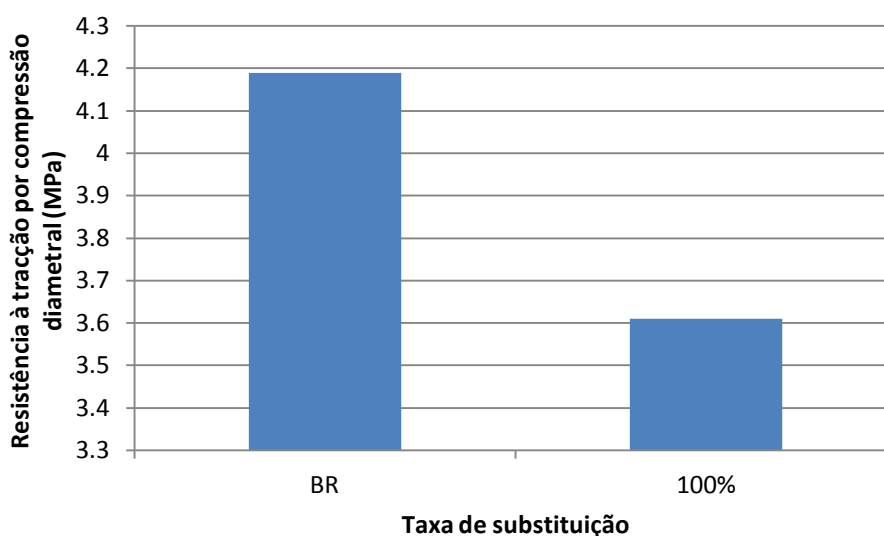


Figura 11 - Resistência à tração por compressão diametral (Yang et al., 2011)

Através da figura, verifica-se que a incorporação de agregados grossos reciclados foi responsável por uma diminuição na resistência à tração por compressão diametral de 14%. Este valor está de acordo com os obtidos nas investigações anteriores.

No entanto, em Etxeberria et al. (2007), embora a resistência à tração por compressão diametral tenha apresentado valores semelhantes nas diversas misturas produzidas, constatou-se que os betões com agregados reciclados obtiveram os valores mais elevados nesta propriedade. Na Figura 12, são apresentados os resultados.

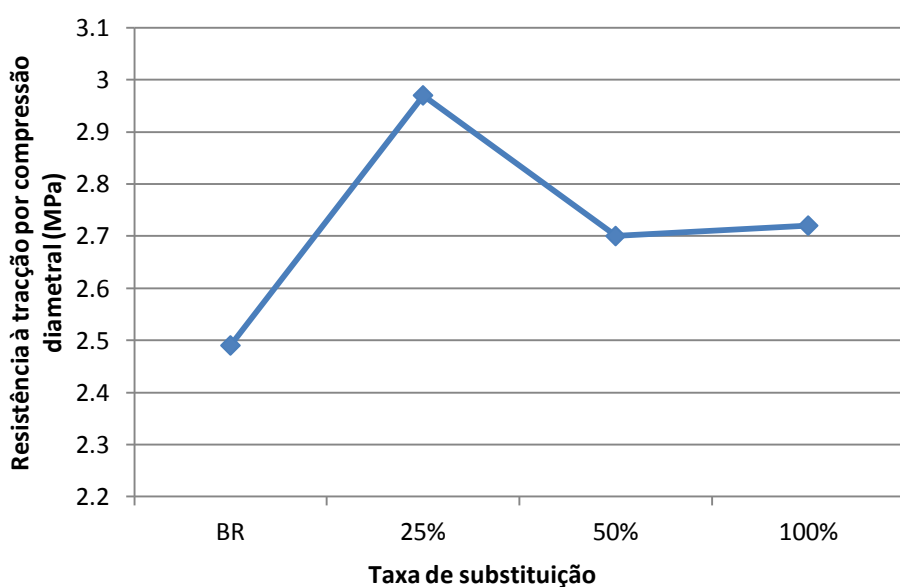


Figura 12 - Resistência à tração por compressão diametral (Etxeberria et al., 2007)

Desta forma, foram obtidos aumentos de resistência de 19, 8 e 9% para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, respectivamente. Tal foi explicado pela capacidade de absorção da argamassa aderida aos agregados reciclados (estes foram molhados por um sistema de aspersão, mas não saturados) e à eficácia da nova ITZ. A ausência de qualquer efeito negativo na resistência à tracção por compressão diametral do betão com agregado reciclado é, em parte, indicativo de boas características de ligação entre o agregado e a matriz de cimento.

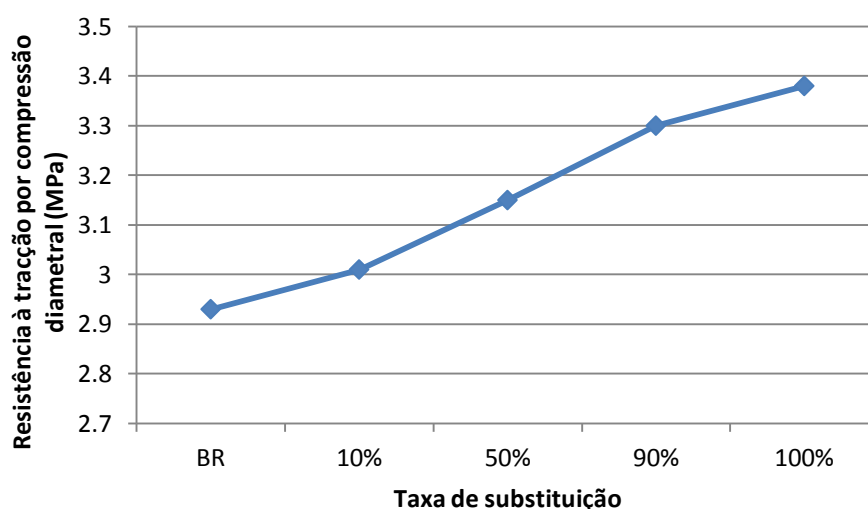
Na Tabela 3, são apresentadas diminuições de resistência à tracção por compressão diametral obtidas nos trabalhos analisados, em betões incorporando 100% de agregados grossos reciclados. Os resultados mostram que as perdas ocorridas, excluindo Etxeberria et al. (2007), se encontram dentro do mesmo intervalo.

**Tabela 3 – Diminuições de resistência à tracção por compressão diametral devidas a AGRB em diferentes investigações**

Autor	Diminuição de resistência à tracção por compressão diametral (%)
Rao et al. (2011)	24
Tabsh e Abdelfatah (2009)	15-30 (Mistura 1 e 2)
Yang et al. (2011)	14
Etxeberria et al. (2007)	-9 (aumento)

No que respeita à incorporação de agregados finos reciclados de betão, é possível que o seu uso contribua para aumentar a rigidez da matriz cimentícia, diminuindo possível microfissuração na zona de interacção pasta / agregado. Esta situação decorre da sua maior rugosidade e melhor capacidade de preenchimento dos poros, resultante das fracções de menor dimensão (LEITE, 2001).

Na Figura 13, é apresentada a evolução da resistência à tracção por compressão diametral, obtida por Leite (2001), em função da taxa de substituição de AFN por AFRB.



**Figura 13 - Resistência à tracção por compressão diametral (Leite, 2001)**



Os resultados mostram uma melhoria do desempenho registado nesta propriedade devido à presença dos agregados finos reciclados. Deste modo, verificam-se aumentos de 3, 8, 13 e 15% para as taxas de 10, 50, 90 e 100%, respectivamente.

Contudo, no estudo de Solyman (2005), observou-se uma tendência contrária, ou seja, uma redução de resistência, embora, pouco significativa, causada pela incorporação de agregados reciclados (Figura 14).

Através da Figura 14, verifica-se que a variação máxima ocorrida foi de 18% para a mistura RC5.

Finalmente, a investigação realizada por Evangelista (2007) concluiu também que a resistência à tracção por compressão diametral é afectada pela incorporação de AFRB, observando-se uma redução até 23% do seu valor relativamente ao BR (Figura 15). O investigador concluiu que a redução da resistência não se deve directamente à pasta mas antes a uma ligação mais débil entre esta e os agregados. Verificou ainda que a relação entre as resistências à tracção por compressão diametral e à compressão apresenta valores mais baixos do que o comum e que tal é justificado com o elevado desempenho mecânico dos betões ensaiados.

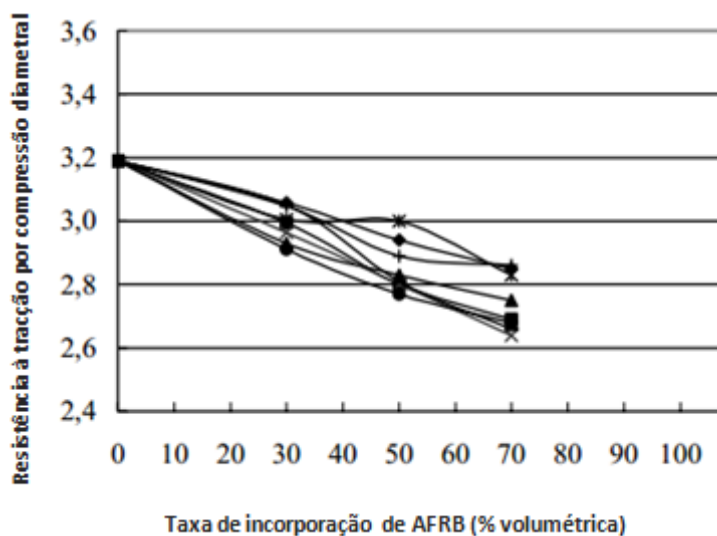
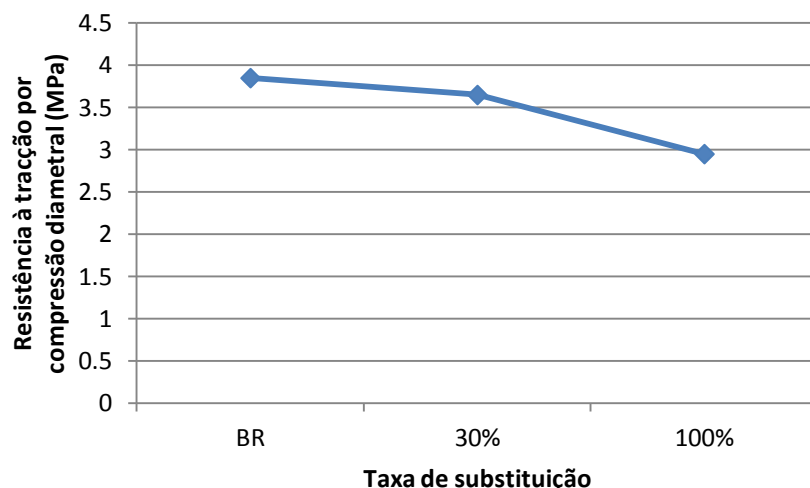


Figura 14 - Resistência à tracção por compressão diametral (Solyman, 2005)



**Figura 15 - Resistência à tração por compressão diametral (Evangelista, 2007)**

Na Tabela 4, são apresentadas diminuições de resistência à tração por compressão diametral obtidas nos trabalhos analisados, em betões incorporando agregados finos reciclados.

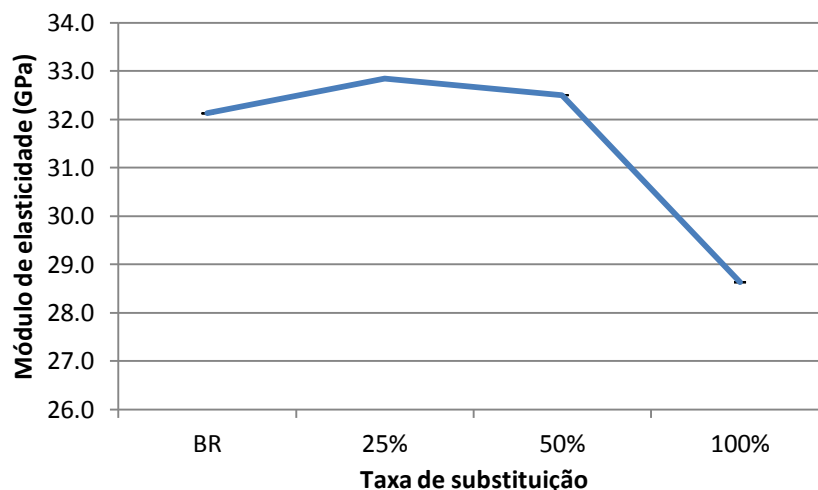
**Tabela 4 - Diminuições de resistência à tração por compressão diametral devidas a AFRB em diferentes investigações**

Autor	Diminuição de resistência à tração por compressão diametral (%)
Leite (2001)	-15 (aumento)
Solyman (2005)	18 (para taxa de substituição de 70%)
Evangelista (2007)	23

### 2.2.3. Módulo de elasticidade

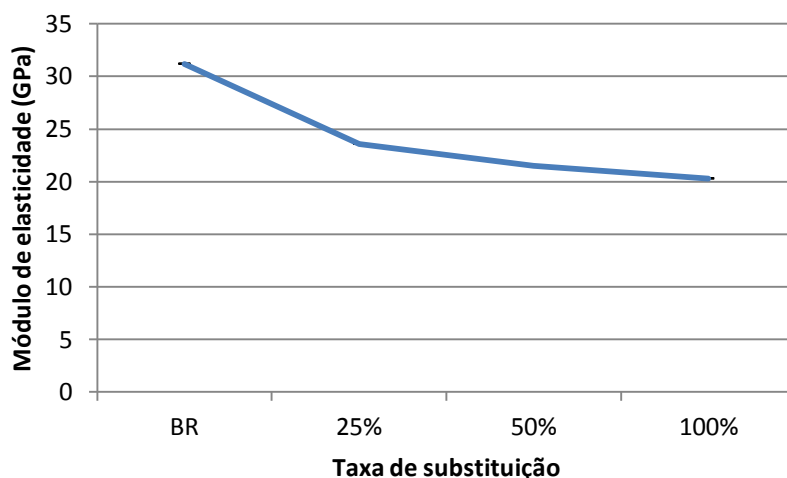
Tal como a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral, também o módulo de elasticidade diminui com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados.

Na Figura 16, são apresentados os resultados obtidos na investigação realizada por Etxeberria et al. (2007). Através da figura, observa-se uma diminuição de aproximadamente 11% para o betão com apenas agregados grossos reciclados. Contudo, para as taxas de 25 e 50%, constata-se que os betões conseguiram atingir valores idênticos ao do betão de referência.



**Figura 16 - Módulo de elasticidade (Etxeberria et al., 2007)**

Os resultados foram explicados pela maior propensão para a deformação dos agregados reciclados relativamente aos agregados naturais. Esta situação é fundamentada pelo menor módulo de elasticidade dos AR (Frondistou-Yannas, 1977) e pelo facto de o módulo do betão depender significativamente do módulo dos agregados (Neville, 2000). Os valores de módulo de elasticidade obtidos no trabalho realizado por Rao et al. (2011) são apresentados na Figura 17.



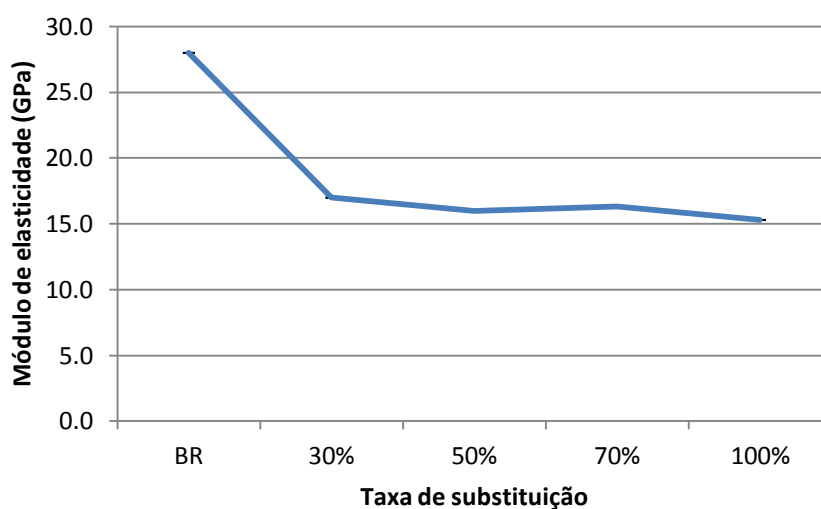
**Figura 17 - Módulo de elasticidade (Rao et al., 2011)**

Analisando a figura, constata-se a existência de uma tendência idêntica para todas as taxas de substituição de NA por AGRB. Neste trabalho, observou-se ainda que a taxa de deformação do betão reciclado sujeito a uma tensão aplicada era mais rápida do que a do betão de referência.

Esta situação foi explicada através da presença de interfaces entre agregados reciclados e argamassa aderida, nova pasta de cimento e argamassa aderida e nova pasta de cimento e agregados, que contribuem para a propagação de fissuras durante o carregamento.

Deste modo, foram obtidas diminuições de 24, 31 e 35% para taxas de incorporação de 25, 50 e 100%. Assim, tendo em conta o referido, estes resultados podem ser justificados pelo menor módulo de elasticidade dos agregados reciclados relativamente aos agregados naturais e à existência de interfaces mais fracas entre os agregados reciclados e antigas e novas argamassas de cimento.

Na investigação conduzida por Xiao et al. (2005), verifica-se, mais uma vez, que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão (Figura 18).



**Figura 18 - Módulo de elasticidade (Xiao et al., 2005)**

Os resultados mostram que para a taxa de substituição de 100%, o módulo de elasticidade é reduzido em 45%. Esta situação foi explicada pelo menor módulo de elasticidade do material reciclado.

As diferenças registadas na diminuição desta propriedade são atribuídas ao módulo de elasticidade dos agregados reciclados que vai diferindo nas diferentes investigações. Por exemplo, Topçu (1995) observou uma diminuição do módulo de elasticidade de 80%. Dhir et Limbachiya (1999) e Ravindrarajah et Tam (1985) também investigaram o módulo de elasticidade de BARB e sugeriram fórmulas de cálculo aproximado. Verificou-se que a relação comumente usada entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade para o betão de referência não era aplicável a betão com agregado reciclado.

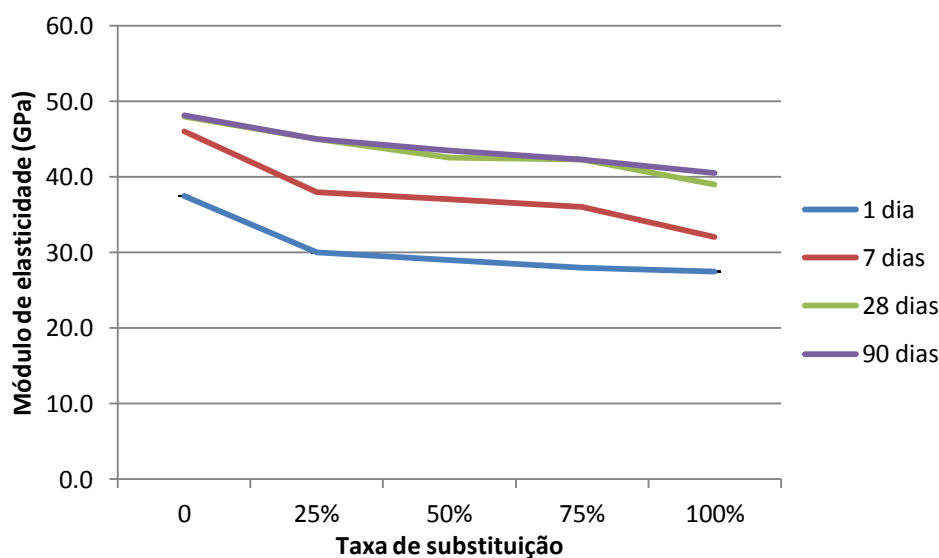
Na Tabela 5, é apresentado um resumo das diminuições do módulo de elasticidade registadas diferentes investigações.

**Tabela 5 - Diminuições de módulo de elasticidade devidas a AGRB em diferentes investigações**

Autor	Diminuição de módulo elasticidade (%)
Etzeberria et al. (2007)	11
Rao et al. (2011)	35
Xiao et al. (2005)	45
Topçu (1995)	80

A substituição de agregados finos naturais por reciclados de betão, tal como sucede nos grossos, é responsável por uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade.

No trabalho desenvolvido por Khatib (2005), constatou-se que o impacto da introdução de AFRB era atenuado para taxas de incorporação entre 25 e 75% (Figura 19). Observou-se também um aumento dos valores obtidos com o aumento do período de cura. Aos 28 dias, foram verificadas diminuições de módulo de elasticidade de cerca de 6, 11, 12 e 19% para as taxas de substituição de 25, 50, 75 e 100%.



**Figura 19 - Módulo de elasticidade (Khatib, 2005)**

Apesar de se verificarem módulos de elasticidade menores nos BAFRB do que no respectivo BR, os resultados de Khatib (2005) apontam para uma redução desta diferença ao longo do período de cura, que se traduz numa rigidificação mais tardia de todos os betões com AFRB, efeito mais evidente para betões com idade entre 7 e 28 dias.

Solyman (2005) concluiu que, apesar de a substituição de AFN por AR diminuir o módulo de elasticidade do betão, este efeito poderia ser atenuado em função do ajuste granulométrico dos agregados reciclados. Constatou-se também que a qualidade dos AR possui grande influência sobre o decréscimo desta propriedade.

Através da Figura 20, verifica-se que os piores desempenhos foram registados nas misturas RC 4, RC 7 e RC 9. Estas misturas corresponderam aos AR com maior porosidade

e maior capacidade de absorção de água. A máxima diminuição registrada foi de 23%.

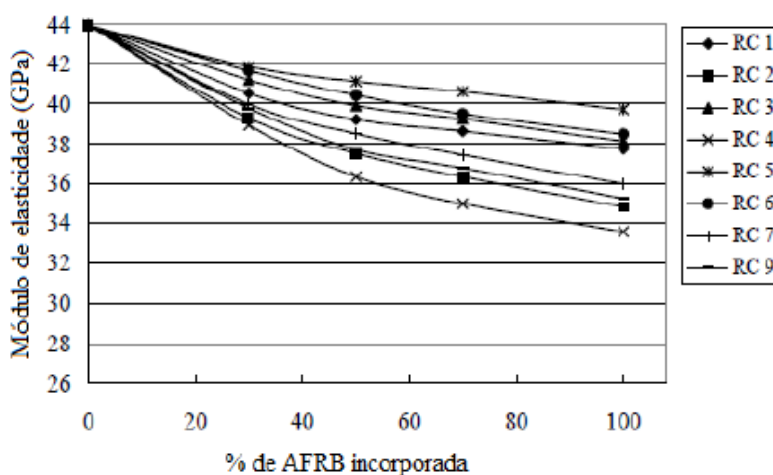


Figura 20 - Módulo de elasticidade (Solyman, 2005)

Na campanha experimental de Evangelista (2007), a incorporação de AFRB, provocou diminuições no módulo de elasticidade dos betões até 19% em relação ao BR (Figura 21). O autor depreende que, como os betões com AFRB são mais porosos e, deste modo, mais deformáveis do que os betões com agregados convencionais, é natural que apresentem maiores deformações para o mesmo nível de tensão.

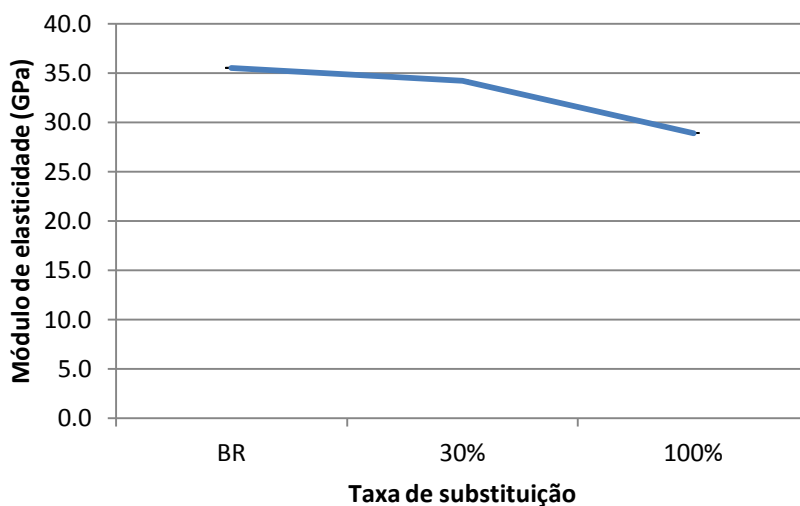


Figura 21 - Módulo de elasticidade (Evangelista, 2007)

Na Tabela 6, são apresentadas diminuições de módulo de elasticidade, aos 28 dias, obtidas nos trabalhos analisados, em betões incorporando 100% de agregados finos reciclados.

Tabela 6 - Diminuições de módulo de elasticidade devidas a AFRB em diferentes investigações

Autor	Diminuição de módulo elasticidade (%)
Khatib (2004)	19
Solyman (2005)	23
Evangelista (2007)	19

#### 2.2.4. Absorção de água

No que respeita à absorção de água, segundo a literatura consultada, existe uma diminuição no desempenho desta propriedade devido à introdução de agregados grossos reciclados de betão.

Thomas et al. (2013) observaram um aumento desta propriedade com o aumento da relação a/c e da taxa de substituição. Na Figura 22, são apresentados os resultados. Verifica-se que a absorção de água para o betão com taxa de substituição de 100% e relação a/c de 0.65 aumenta de 6,2% para 8,4% em relação ao betão de referência, representando um acréscimo de 35%.

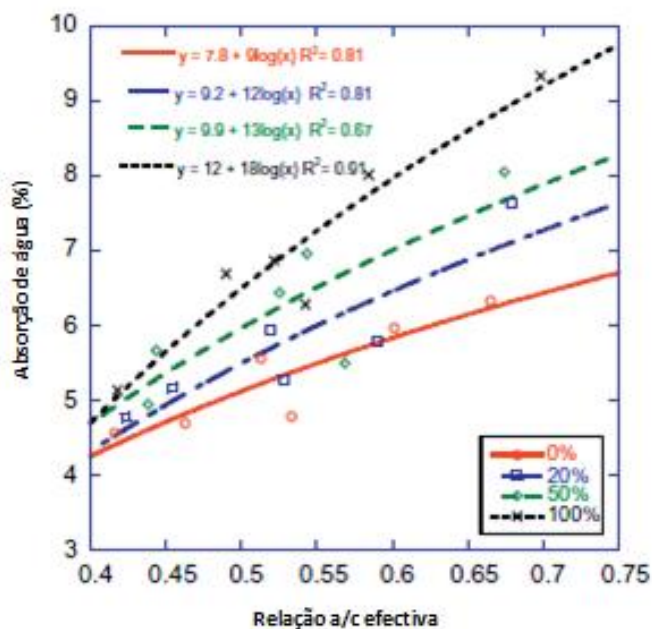
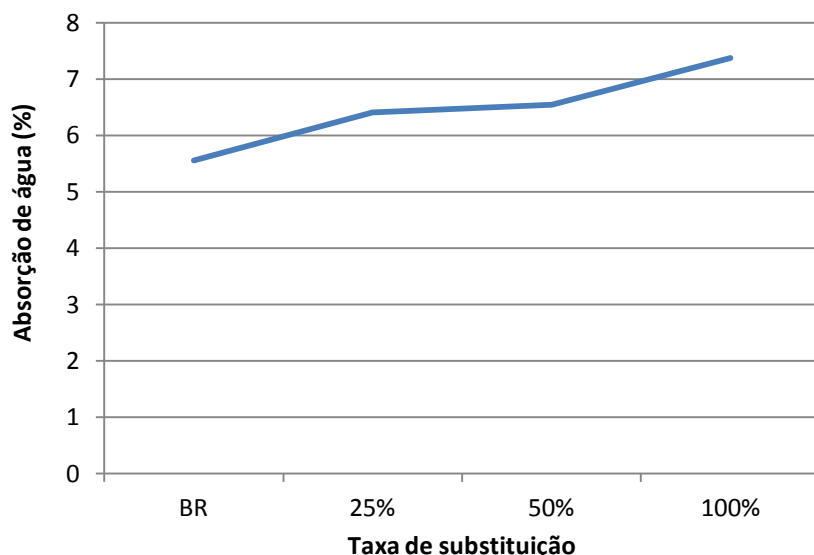


Figura 22 - Absorção de água (Thomas et al., 2013)

Neste estudo, conclui-se ainda que, com o tempo, as diferenças de absorções entre betões com agregados reciclados e betões de referência são reduzidas. Foram realizados ensaios aos 28, 180 e 365 dias.

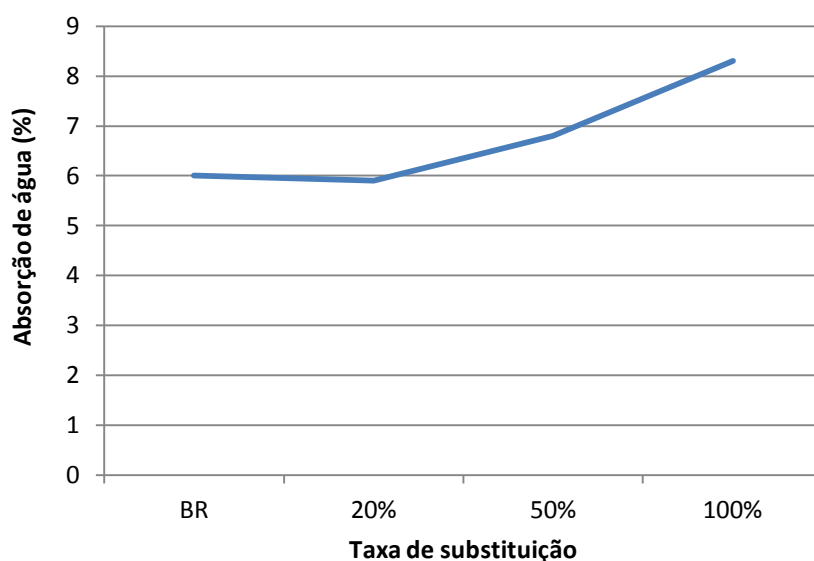
No trabalho de Rao et al. (2011), observou-se que a absorção de água aumentava proporcionalmente com o aumento da incorporação de agregados reciclados (Figura 23). Esta situação foi justificada pelo facto de a absorção de água dos agregados grossos reciclados ser 3,5 vezes maior do que a dos agregados naturais.

Deste modo, os resultados mostram aumentos de 15, 18 e 33% nos valores de absorção para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%.



**Figura 23 - Absorção de água (Rao et al., 2011)**

Também na investigação conduzida por Levy et Helene (2004) se observa um aumento dos valores obtidos com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados. Este comportamento foi justificado pela absorção dos AR, cerca de 6 vezes maior do que a dos AN. Na Figura 24, são apresentados os resultados obtidos.



**Figura 24 - Absorção de água (Levy et Helene, 2004)**

Através da figura, constata-se que o comportamento referido não foi observado para a taxa de substituição de 20%. Este betão apresenta menor absorção do que o betão de referência. Esta situação foi explicada através de mudanças na granulometria dos agregados (factores de compactação). No entanto, registaram-se aumentos de 13% e 38% para as percentagens de incorporação de 50 e 100%, respectivamente, estando estes valores em concordância com os estudos anteriores.



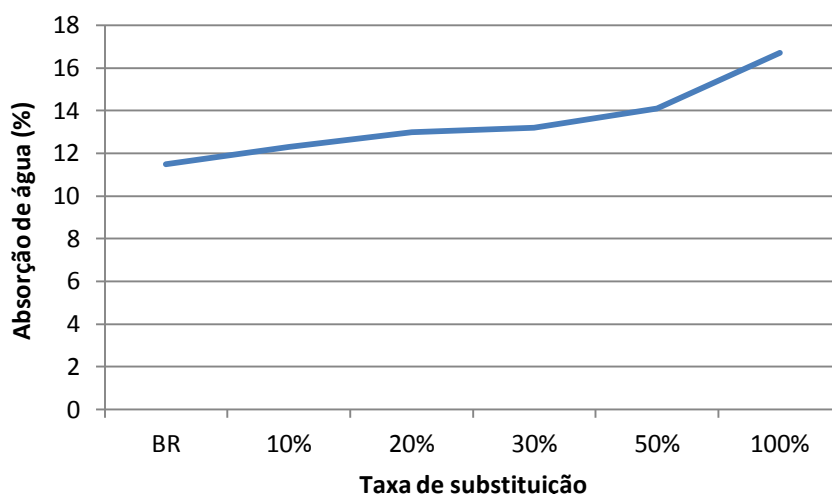
Na Tabela 7, é apresentado um resumo dos aumentos dos coeficientes de absorção registrados nas diversas investigações, devido à presença de agregados reciclados de betão.

**Tabela 7 - Aumentos de absorção de água devidos à incorporação de AGRB em diferentes investigações**

Autor	Aumento de absorção de água (%)
Thomas et al. (2013)	35 (para a/c = 0.65)
Rao (2011)	33
Levy e Helene (2004)	38

No que concerne à incorporação de agregados finos reciclados de betão, observa-se, de igual modo, uma tendência de subida da absorção de água com o aumento da taxa de substituição de AFRB.

No trabalho de Evangelista (2010), o betão incorporando 100% de agregados grossos reciclados regista um aumento de absorção de cerca de 45%. Na Figura 25, são apresentados os resultados obtidos.

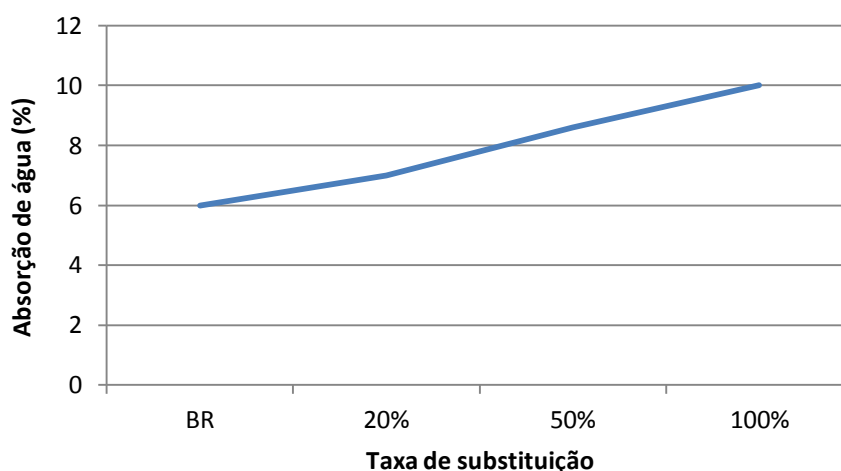


**Figura 25 - Absorção de água (Evangelista, 2010)**

Os valores obtidos são justificados pelo investigador através do crescimento da porosidade aberta na estrutura dos provetes, com o aumento da taxa de substituição de AFN por AFR, uma vez que estes são substancialmente mais porosos.

Levy (2001) refere que a resistência à compressão tem um papel importante na absorção de água por imersão, dado que, quando a resistência à compressão passa de 20 para 40 MPa, a taxa de absorção de água passa de 7,4% para 6,1% e o índice de vazios de 16% para 13,6%. Também neste trabalho, foram registados elevados aumentos de absorção devido à presença de AFRB (Figura 26). No caso da substituição total, o aumento foi de aproximadamente 65%. O investigador justifica os resultados referindo que a maior absorção de água por par-

te dos AFRB irá provocar uma maior absorção de água por parte da pasta de cimento.



**Figura 26 - Absorção de água (Levy, 2001)**

Na Tabela 8, são apresentados os aumentos de absorção devidos à presença de agregados finos reciclados de betão nas investigações de Levy (2001) e Evangelista (2010).

**Tabela 8 - Aumentos de absorção de água devidos à incorporação de AFRB em diferentes investigações**

Autor	Aumento de absorção de água (%)
Levy (2001)	45
Evangelista (2010)	65

### 2.2.5. Absorção de água capilaridade

De modo idêntico à propriedade anterior, também a absorção de água por capilaridade regista um pior desempenho quando são utilizados agregados grossos reciclados. Na Figura 27, observa-se a influência dos AR no desempenho dos BAR, nos estudos de Kou et Poon (2012) e Gonçalves et al. (2004).

Os resultados mostram um aumento dos valores obtidos à medida que se substituem agregados naturais por agregados reciclados. No trabalho de Kou et Poon (2012), verificam-se aumentos de 38% e 85% para as taxas de substituição de 50 e 100%, respectivamente. Gonçalves et al. (2004) obtiveram aumentos idênticos, cerca de 46 e 75%, respectivamente. Estas conclusões são atribuídas à maior absorção do agregado reciclado relativamente ao agregado natural. Na Tabela 9, são apresentados os aumentos de absorção devidos à presença de AGRB nas duas investigações.

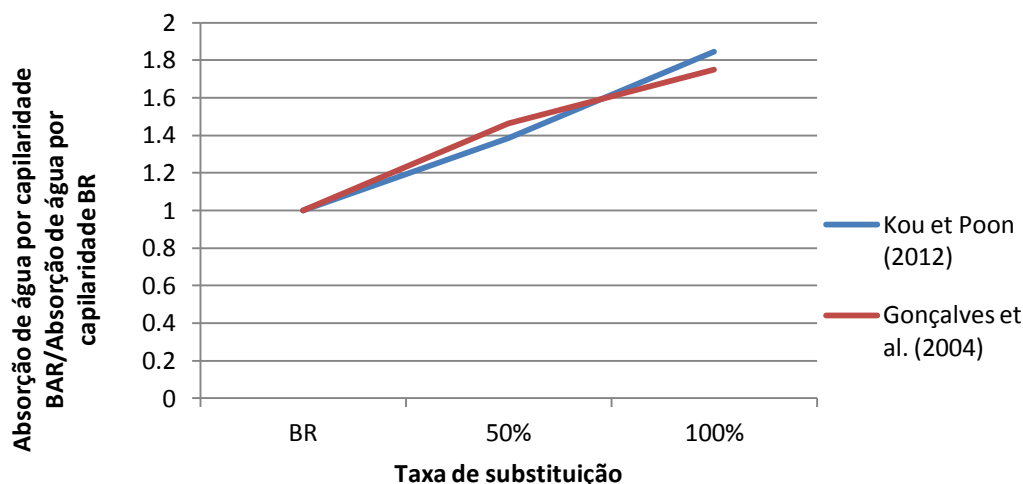


Figura 27 - Absorção de água por capilaridade em diferentes investigações

Tabela 9 - Aumentos de absorção de água por capilaridade devidos a AGRB em diferentes investigações

Autor	Aumento de absorção por capilaridade (%)
Kou e Poon (2012)	85
Gonçalves et al. (2004)	75

Relativamente à substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados de betão, as conclusões são idênticas.

No trabalho conduzido por Zega e Di Maio (2011) procurou-se caracterizar a capacidade de absorção de água, entendida pelos autores como o máximo valor de absorção obtido a massa constante. Na Figura 28, são apresentados os resultados obtidos. Analisando a figura, verifica-se que a absorção de água nos BAFRB é um pouco superior à dos BR, o que foi justificado pela maior absorção de água dos AFRB. Registou-se um aumento de 13% para ambos os betões incorporando AFRB, relativamente ao betão de referência.

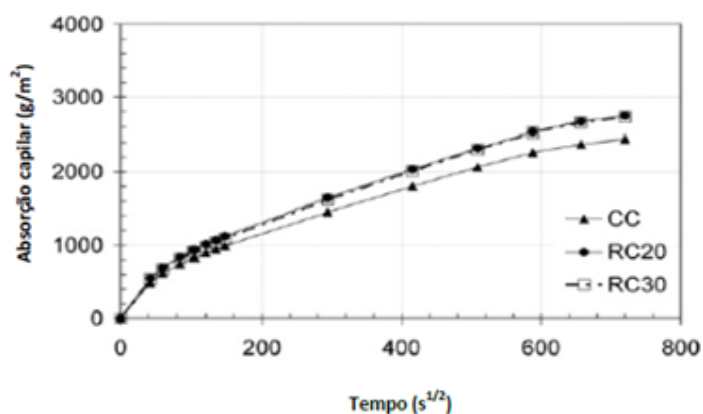


Figura 28 - Absorção de água capilaridade (Zega e Di Maio, 2011)

Contudo, na investigação de Evangelista (2010), observou-se um aumento da absorção

de água por capilaridade muito maior (Figura 29). Segundo o autor, o aumento está possivelmente relacionado com a porosidade dos betões crescer linearmente com o aumento de incorporação dos AFRB, que faria crescer, da mesma forma, a frequência e comprimento dos capilares. Desta forma, verifica-se que os valores obtidos, às 72 horas, para o betão de 30 e 100% de AFRB são, respectivamente, duas e três vezes mais do que os registados para o BR.

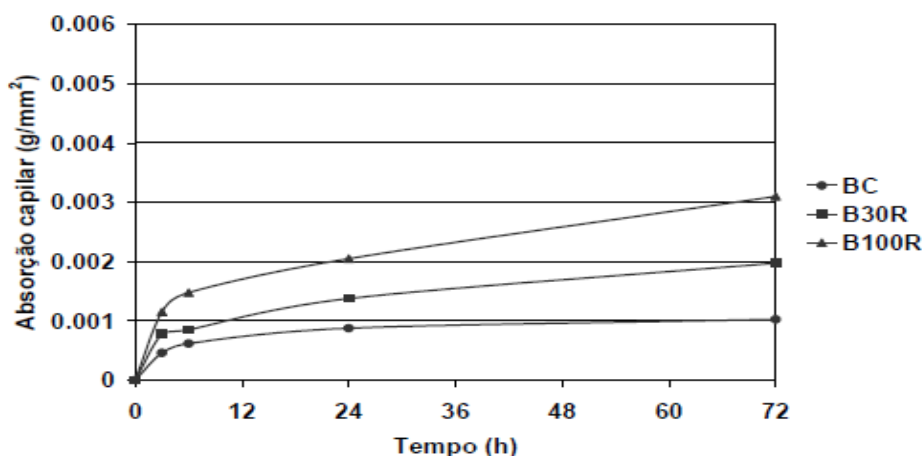


Figura 29 - Absorção de água capilaridade (Evangelista, 2010)

Na Tabela 10, são apresentados os aumentos de absorção devidos à presença de agregados finos reciclados de betão em Zega e Di Maio (2011) e Evangelista (2010).

Tabela 10 - Aumentos de absorção de água capilaridade devidos a AFRB em diferentes investigações

Autor	Aumento de absorção por capilaridade (%)
Zega e Di Maio (2011)	13 (para taxa de substituição de 30%)
Evangelista (2010)	100 (para taxa de substituição de 30%)

### 2.2.6. Resistência à carbonatação

Relativamente à resistência à carbonatação, ainda existe pouca informação sobre os efeitos da substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão, sendo por vezes contraditória. Por exemplo, segundo Limbachiya et al. (2012), os betões com AR apresentaram comportamentos distintos, enquanto Levy et Helene (2004) verificaram que a profundidade de carbonatação decresce quando a quantidade de agregados reciclados aumenta. Por outro lado, no trabalho realizado por Kou et Poon (2012), constatou-se um pior desempenho nesta propriedade com o aumento da taxa de substituição. Na Figura 30, são apresentados os resultados obtidos por Levy e Helene (2004). Através da figura, verifica-se que a profundidade de carbonatação diminui quando a quantidade de agregados reciclados aumenta, apresentando um comportamento significativamente

melhor para as taxas de substituição de 20 e 50%. No entanto, para a taxa de 100%, a carbonatação ainda é menor relativamente ao betão de referência.

Esta situação foi explicada pela maior quantidade de cimento no betão com agregados reciclados, necessária para se obter a mesma resistência do betão de referência. Assim, as dosagens de cimento variaram entre 392 e 422 kg/m<sup>3</sup>.

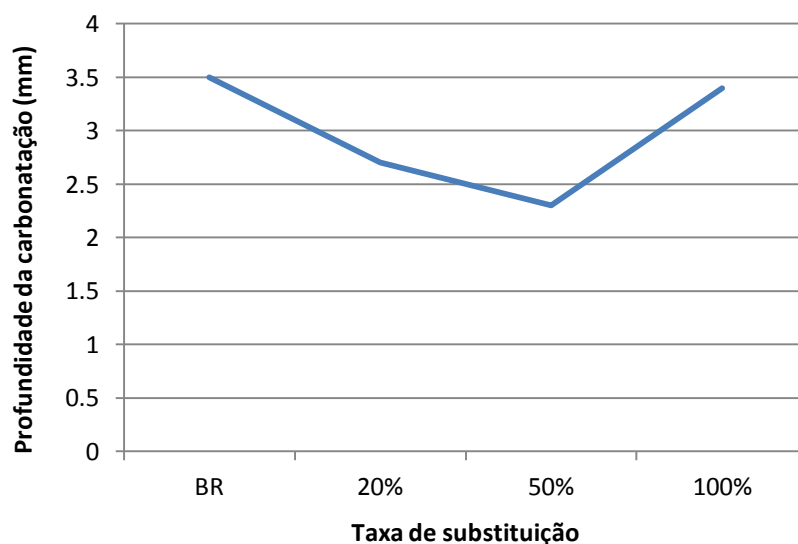


Figura 30 - Resistência à carbonatação (Levy e Helene, 2004)

Deste modo, entende-se que a reserva alcalina superior actua protegendo a superfície do betão contra os mecanismos de carbonatação. Além disto, sendo os agregados reciclados constituídos em parte por uma argamassa de cimento e partículas de hidróxido de cálcio, poderá também haver um aumento da reserva alcalina dos betões reciclados. Na Figura 31, são apresentados os resultados obtidos por Kou e Poon (2012), verificando-se que a profundidade de carbonatação aumenta com a presença de agregados reciclados.

A conclusão referida era expectável, uma vez que, no mesmo estudo, a absorção capilar e a penetração de cloretos apresentaram a mesma tendência.

Finalmente, na investigação conduzida por Limbachiya et al. (2012) (Figura 32), apesar de se verificar uma menor resistência com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados, não foi seguida a tendência de Kou e Poon (2012), ou seja, piores desempenhos para as taxas de substituição superiores.

Neste estudo, referiu-se que a água armazenada no sistema de poros do betão reciclado e libertada ao longo do processo de hidratação pode contribuir no processo de carbonatação das misturas produzidas com AR. Devido à elevada absorção de água dos agregados grossos reciclados, os betões de referência apresentam geralmente teores de humidade mais baixos do que os betões com agregados reciclados. Assim, e sabendo que a

carbonatação do betão ocorre a uma humidade relativa de cerca de 40 a 70 %, esta situação poderá explicar a baixa resistência à carbonatação de betões contendo AGRB.

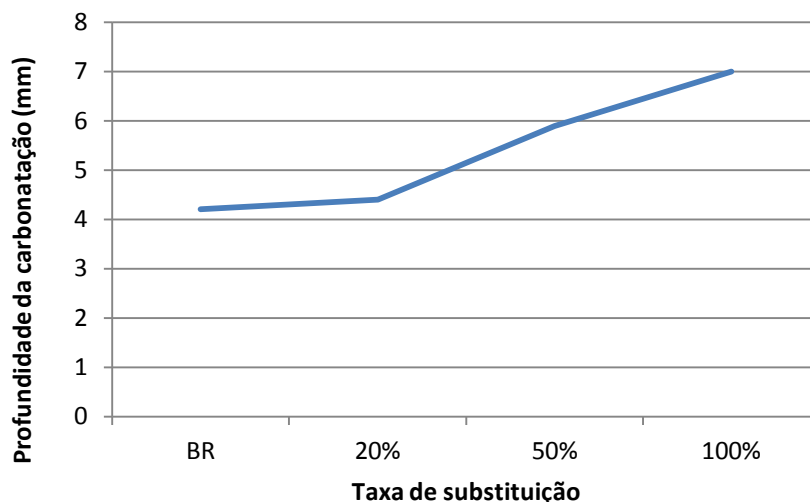


Figura 31 - Resistência à carbonatação (Kou e Poon, 2012)

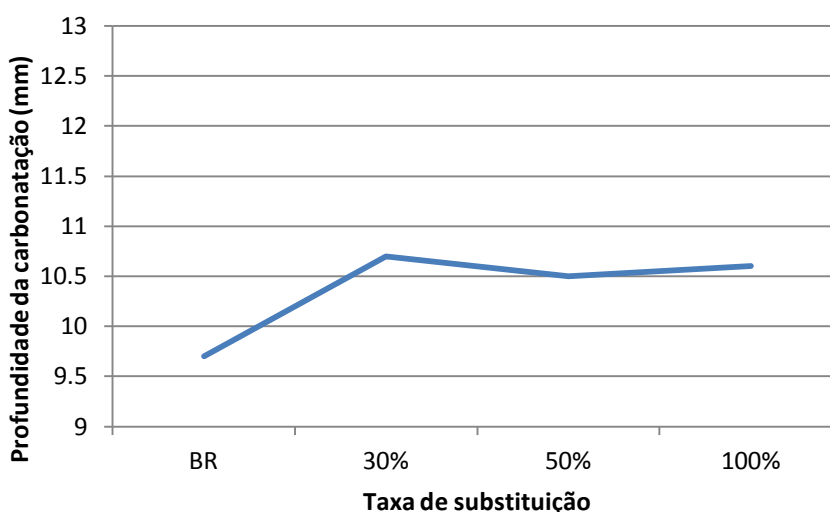


Figura 32 - Resistência à carbonatação (Limbachiya et al., 2012)

Na Tabela 11, são apresentados as variações de resistência à carbonatação devidas à presença de agregados grossos reciclados de betão.

Tabela 11 - Diminuições de resistência à carbonatação devidas a AGRB em diferentes investigações

Autor	Diminuição de resistência à carbonatação (%)
Levy e Helene (2004)	- 3 (aumentou)
Kou e Poon (2012)	67
Limbachiya et al. (2012)	10

No que respeita à incorporação de agregados finos reciclados de betão os resultados obtidos pelos diferentes investigadores também não são consensuais.

No trabalho de Levy (2001), constata-se que, para betões com resistências de 20 e 30 MPa, a profundidade de carbonatação nos BAFRB é inferior ao do betão de referência, enquanto para os betões de 40 MPa, não é observada qualquer variação (Figura 33). Verifica-se que, para qualquer taxa de substituição, os valores obtidos são semelhantes nos betões com AR.

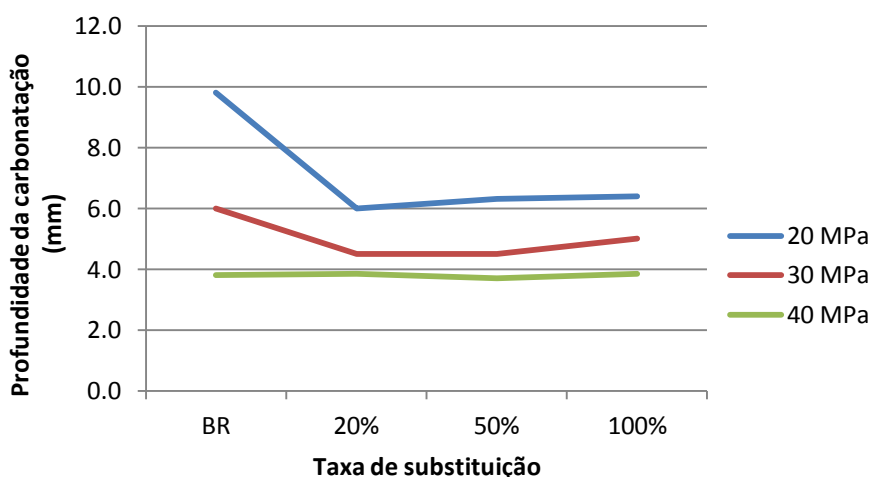


Figura 33 - Resistência à carbonatação (Levy, 2001)

Segundo o investigador, a influência da qualidade dos agregados no desempenho dos betões diminui à medida que a resistência do betão aumenta. Desta forma, para resistências à compressão superiores, a qualidade da pasta assume maior preponderância.

Os BAFRB sofreram um acréscimo no consumo de cimento, pelo que é natural que haja uma redução da profundidade de carbonatação. No entanto, o autor refere que, se o mesmo acréscimo tivesse sido feito para o BR, este não teria o mesmo efeito, sendo a redução da profundidade de carbonatação muito mais ligeira neste caso.

Seria expectável que os BAR, apresentando uma maior absorção e índice de vazios, apresentassem uma frente de carbonatação mais profunda. No entanto, Levy (2001) refere que os produtos químicos formados nas reacções de carbonatação actuam de alguma forma como retardadores deste fenómeno, independentemente da taxa de AR usada, à semelhança do concluído por Barra (1996).

O estudo conduzido por Solyman (2005) mostra, de igual modo, que a incorporação de AFRB não teve consequências significativas na carbonatação dos betões, verificando-se uma variação máxima de 10% (Figura 34).

Os resultados foram justificados pelo investigador pelo facto de a carbonatação ser um processo dependente da densidade estrutural e do estado de humidade do betão, propriedades que são afectadas com a utilização de AR.

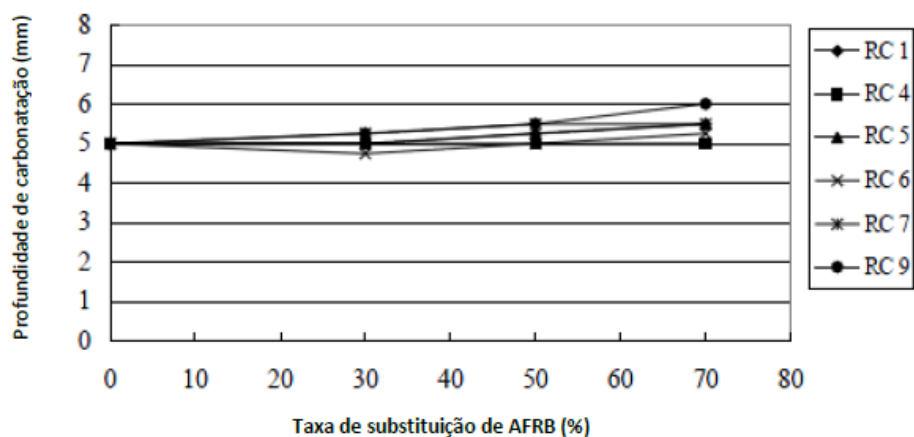


Figura 34 - Resistência à carbonatação (Solyman, 2005)

Na Figura 35, são apresentados os resultados obtidos por Evangelista (2010). Através da figura, verifica-se que não existiu avanço da carbonatação durante 7 e 14 dias, no betão de referência e no betão incorporando 30% de AFRB. De forma contrária, a mistura com a máxima taxa de substituição iniciou o processo de carbonatação logo no instante inicial das medições. Relativamente à influência dos AFRB, verificam-se aumentos de carbonatação aos 91 dias de aproximadamente 28% e 70% para as taxas de 30 e 100%, respectivamente.

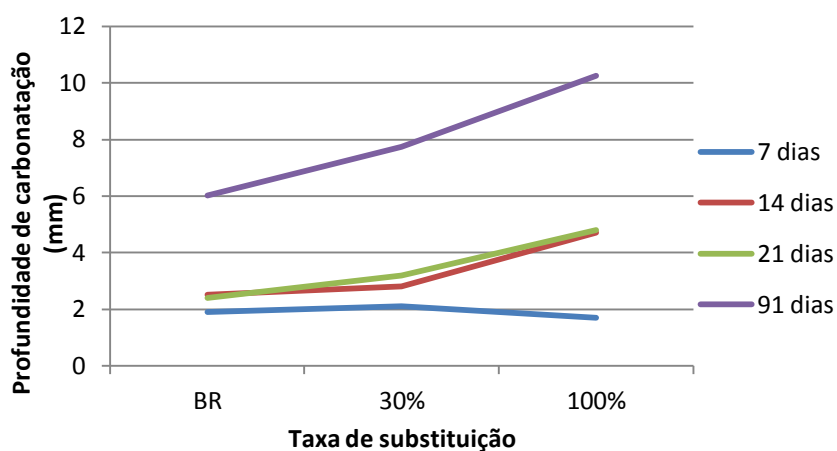


Figura 35 - Resistência à carbonatação (Evangelista, 2010)

Na Tabela 12, são apresentados as variações de resistência à carbonatação devidas à presença de agregados finos reciclados de betão.

Tabela 12 - Diminuições de resistência à carbonatação devidas a AFRB em diferentes investigações

Autor	Diminuição de resistência à carbonatação (%)
Levy (2001)	- 1 (aumentou para o betão 40 MPa)
Solyman (2005)	10
Evangelista (2010)	70

### 2.2.7. Resistência à penetração de cloretos



Quanto a esta propriedade, verifica-se que a presença de agregados grossos reciclados no betão é responsável por uma diminuição da resistência à penetração de iões cloreto. Na Figura 36, são apresentados os resultados obtidos por Rao et al. (2011). Observa-se que a substituição de AN por AGRB provoca um aumento da profundidade de penetração.

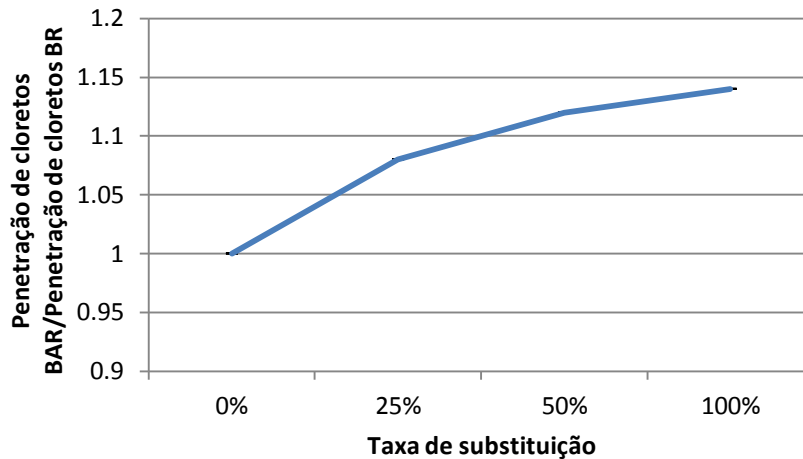


Figura 36 - Influência da incorporação de AGRB (Rao et al., 2011)

Os valores obtidos são justificados pela natureza mais permeável do betão com agregados reciclados, pela argamassa porosa aderida e pela antiga ITZ. Contudo, a diferença registada entre o betão de referência e betão contendo 100% de AGRB é de apenas 14%.

No trabalho desenvolvido por Kou e Poon (2012), verifica-se novamente que a resistência à penetração de iões cloreto diminui quando a quantidade de agregados grossos reciclados aumenta (Figura 37).

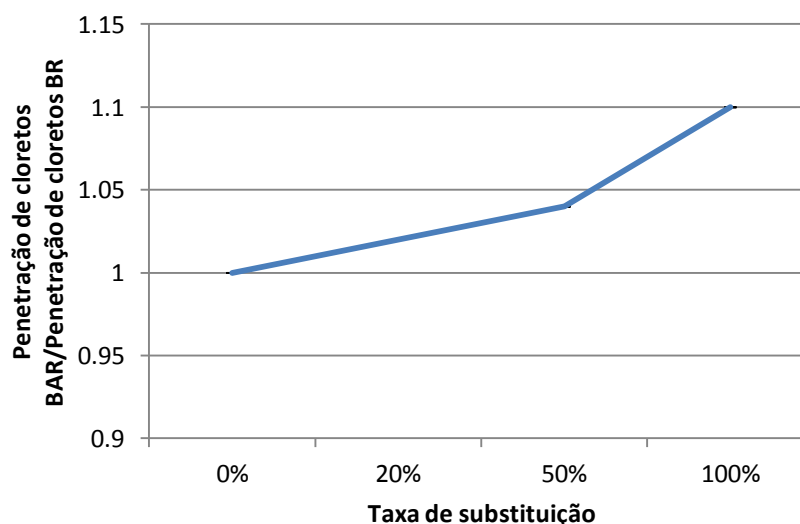


Figura 37 - Influência da incorporação de AGRB (Kou e Poon, 2012)

Para as taxas de substituição de 20 e 50%, registam-se diminuições pouco significativas,

cerca de 2% e 4%, respectivamente. Para incorporação máxima de AGRB, a variação máxima ocorrida foi de 10%. De igual modo, Amorim et al. (2012) observam uma perda de desempenho nesta propriedade devido à presença de AR (Figura 38).

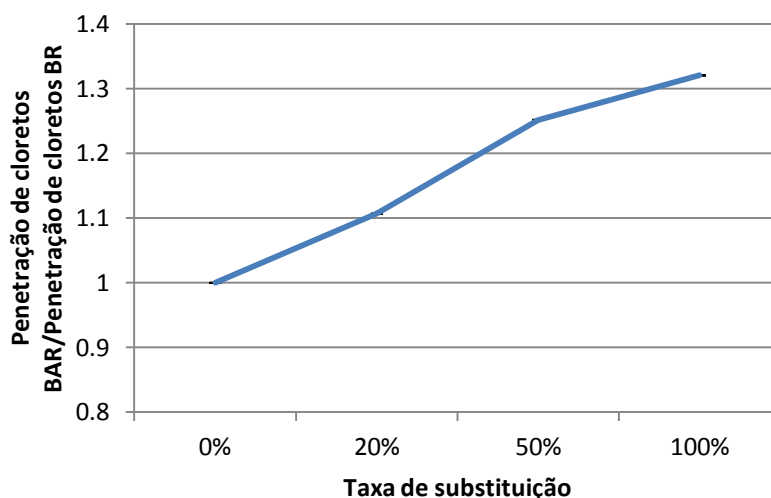


Figura 38 - Influência da incorporação de AGRB (Amorim et al., 2012)

Segundo os autores, como a penetração de cloretos depende de fatores idênticos aos da absorção de água e carbonatação, é natural que as diferenças entre o betão de referência e betão com AR sejam também atribuídas à alta porosidade do material reciclado.

Na Tabela 13, são apresentadas as diminuições de resistência à penetração de cloretos, obtidas nos trabalhos analisados, em betões com 100% de agregados grossos reciclados.

Tabela 13 - Diminuições de resistência à penetração de cloretos devidas a AGRB em várias investigações

Autor	Diminuição de resistência à penetração de cloretos (%)
Rao et al. (2011).	14
Kou e Poon (2012)	10
Limbachiya et al. (2012)	32

Quanto à substituição de agregados naturais por agregados finos reciclados de betão, constata-se igualmente uma perda de desempenho na resistência à penetração de cloretos. Esta situação é explicada pelo facto de esta propriedade ser fortemente influenciada pela permeabilidade, sendo expectável que betões com agregados reciclados (finos e grossos) apresentem um pior desempenho. O referido é corroborado por Coutinho e Gonçalves (1997), que indicam que a penetração de iões cloreto é muito condicionada pela porosidade dos betões e, apresentando os BAR piores desempenhos neste aspecto, são também mais afectados pela penetração de cloretos. Os autores referem ainda que existe uma correlação estreita entre a penetração de cloretos e a absorção de água por parte dos BAR. Deste modo, no trabalho desenvolvido por Evangelista (2010), concluiu-se que o coefi-

ciente de migração aumenta de forma clara com o aumento de substituição de AFRB, ou seja, a resistência dos BAFRB vai-se reduzida à medida que aumenta a taxa de incorporação de material reciclado (Figura 39). A variação máxima em relação ao betão de referência foi de 34% e correspondeu ao betão com incorporação total de AFRB.

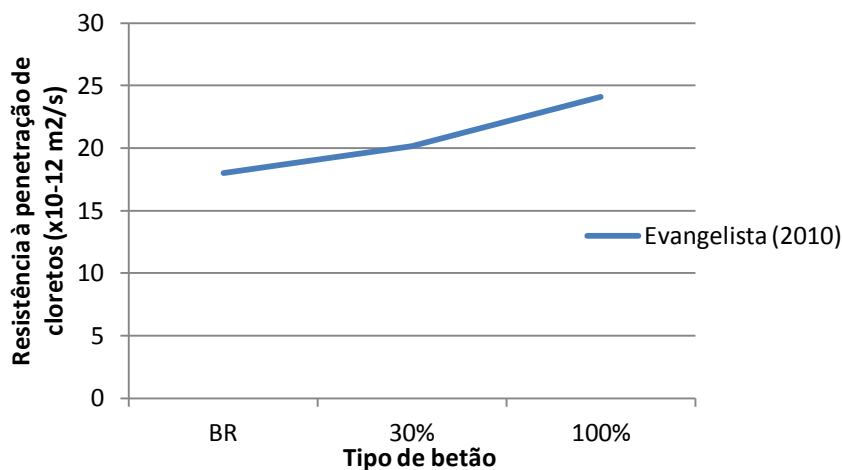


Figura 39 - Resistência aos cloretos (Evangelista, 2010)

No estudo de Levy (2001), constatou-se que betões com resistências à compressão superiores apresentam, nesta propriedade, desempenhos superiores. Deste modo, verificou-se uma diminuição de resistência à penetração de cloretos de cerca de 30% quando se passa de um betão com 40 MPa para outro com 20 MPa, independente da taxa de substituição realizada. Relativamente ao efeito da incorporação de AFRB, observou-se uma perda de desempenho de aproximadamente 36% para a taxa de substituição de 100% (Figura 40).

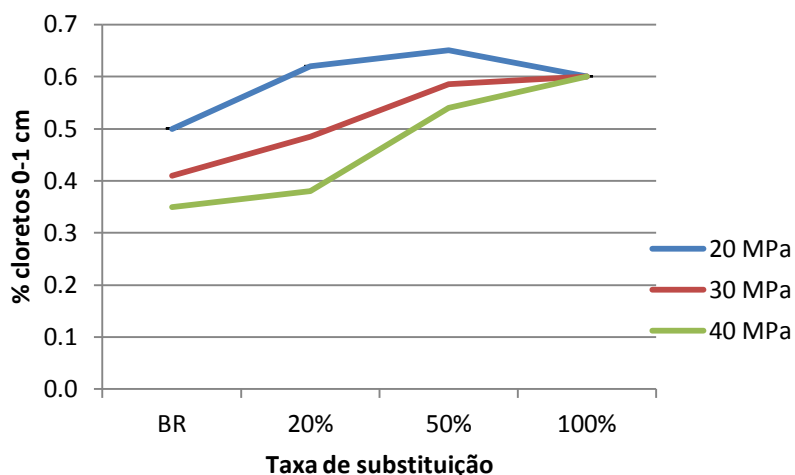


Figura 40 - Resistência aos cloretos (Levy, 2001)

Na Tabela 14, são apresentadas as diminuições de resistência à penetração de cloretos, obtidas nos estudos de Evangelista (2010) e Levy (2001), em betões incorporando 100% de agregados finos reciclados.

**Tabela 14 - Diminuições de resistência à penetração de cloretos devidas a AFRB em várias investigações**

Autor	Diminuição de resistência à penetração de cloretos (%)
Evangelista (2010)	34
Levy (2001)	36

### **2.3. Propriedades de BED com agregados reciclados de betão**

O aparecimento dos superplastificantes permitiu o fabrico de betões com razões água / ligante bastante reduzidas. Inicialmente, nas aplicações destes betões procuravam-se resistências mecânicas elevadas e, por isso, começaram a ser designados por betões de elevada resistência (BER). No entanto, com o tempo, foi demonstrado que este produto possuía outras qualidades, evidenciando desempenhos bastante satisfatórios em termos de durabilidade e resistência à abrasão.

Neste contexto, a designação BER tornou-se inadequada para descrever a totalidade das melhorias verificadas nesta nova família de betões, surgindo, conseqüentemente, a expressão betão de elevado desempenho (BED).

Em Mehta e Aïtcin (1990), a designação BED foi utilizada para classificar composições de betões que possuíssem três características diferentes: elevada trabalhabilidade, alta resistência e elevada durabilidade. Deste modo, estabeleceu-se a principal diferença entre BED e BER, que é a elevada durabilidade exigida aos betões de elevado desempenho.

No entanto, a terminologia BED, é muitas vezes criticada por ser demasiado vaga e até mesmo como não tendo qualquer significado. Questões como: o que é o desempenho de um betão e como pode ser medido são levantadas.

A NP EN 206-1 (2005) considera que um betão para ser classificado como BER deve pertencer a uma classe de resistência superior a C50/60. Porém, apesar de apresentar uma divisão clara entre BER e betões convencionais, esta norma não contempla o termo BED, não fazendo qualquer referência a este tipo de designação.

O ACI adoptou uma definição abrangente para BED, proposta em 1999 por Russel, baseada em Zia (1993): betão que congrega a combinação de desempenhos e requisitos uniformes especiais, que não podem ser atingidos rotineiramente recorrendo a constituintes e amassaduras convencionais e práticas correntes de colocação e cura. Acrescenta ainda, em comentário, que um BED é um betão em que certas características foram desenvolvidas para uma aplicação particular inserida num determinado ambiente.

Os BED são constituídos por cimento, agregados finos, grossos, adições minerais (por exemplo, cinzas volantes, escória de alto forno, pó de sílica) e/ou adjuvantes (superplas-

tificante) e água (Bharatkumar et al., 2001; Lim et al., 2004).

Em geral, são empregues cimentos CEM I, da classe 42.5 ou 52.5, em quantidades elevadas, compreendidas, em geral, entre 400 e 500 kg/m<sup>3</sup>, podendo, no entanto, ultrapassar esta gama de valores.

Os BED apresentam uma relação água / ligante entre 0,30 e 0,40, sendo normalmente mais duráveis, não só por serem menos porosos, mas também porque as suas redes capilares e poros não se encontram ligados (Aïtcin, 2003). Assim, existe a necessidade de um processo de cura diferente, uma vez que a presença de elevadas quantidades de cimento e a reduzida dosagem de água podem potenciar riscos de fissuração por retracção, nomeadamente por retracção plástica e autogénea. Desta forma, a principal diferença entre o betão tradicional e o betão de alto desempenho, a este nível, é que o primeiro praticamente não apresenta retracção autogénea (produtos de hidratação do ligante com menor volume do que os seus reagentes), sendo ou não curado com água, enquanto o segundo pode apresentar valores significativos, se não for submetido a cura saturada durante o processo de hidratação (Aïtcin, 2003).

Em geral, os BED são dotados de resistências mecânicas (nomeadamente a resistência à compressão) superiores às dos betões convencionais. No entanto, a resistência não é sempre a principal propriedade requerida para este tipo de betões.

Os desenvolvimentos ocorridos neste produto têm conduzido a um pleno aproveitamento dos seus constituintes, permitindo assim alargar o ciclo de vida desta “rocha natural”. Seja como for, o betão nunca vai ser um material eterno, quando medido com um intervalo de tempo geológico. No entanto, tendo em consideração o conceito de desenvolvimento sustentável, a indústria do betão tem de implementar uma variedade de estratégias em relação ao seu uso, que passam, por exemplo, pela melhoria da durabilidade do betão e uma melhor e maior utilização de agregados reciclados.

No que respeita a este último vector, a utilização de RCD foi introduzida na prática há muitos anos e desde o início tem sido considerada em dois aspectos ambientais principais: resolver o problema de armazenamento de resíduos e preservar as fontes limitadas de agregados naturais (RILEM Symposium, 1988; RILEM Technical Committee, 1986). Tanto no passado recente como na actualidade, a abundância de estruturas demolidas, que originalmente foram erguidas utilizando betão com média / alta resistência, constitui uma fonte significativa de resíduos de boa qualidade.

Esta realidade foi particularmente sentida nos países da Europa Central e Oriental, onde os programas intensivos de modernização e reconstrução de estradas, pontes, estruturas muni-

cipais e industriais começaram por volta de 1990. Não raramente foi necessário demolir estruturas relativamente jovens, por exemplo com 15 anos de idade ou menos, porque as características funcionais não se encaixam nos novos projectos (Lauritzen, 1993). Tais situações são típicas de pontes rodoviárias, para que as vigas de betão com vãos de 15-18 m não são agora suficientes e têm de ser removidas para alargar o espaço livre disponível.

No entanto, foram feitas apenas algumas tentativas de utilização de agregados reciclados de betão na produção de BED, devido aos aspectos negativos já referidos, inerentes ao uso de ARB.

Contudo, a incorporação deste material reciclado em BED é importante, uma vez que este produto é cada vez mais utilizado em todo mundo. A utilização de ARB na indústria da construção poderia conduzir a uma convergência com o desenvolvimento sustentável. A adequação de agregados reciclados de betão para aplicações com um grau de exigência baixo ou moderado tem sido extensivamente testada e provada por muitos autores.

Nos últimos tempos, métodos de dosagem e taxas de substituição foram estabelecidas, considerando as propriedades dos ARB, de forma a alcançar propriedades satisfatórias, tanto no estado fresco como endurecido. Alguns autores sugeriram que o uso de agregado reciclado de betão poderia ser estendido para betão de elevado desempenho, oferecendo um valor adicional a este material.

Limbachiya et al. (2000) examinaram a influência de AGRB em betão de alta resistência (de 50 MPa ou mais). Verifica-se que os ARB apresentam uma diminuição entre 7 e 9% da massa volúmica saturada com a superfície seca e duas vezes mais absorção do que os agregados naturais, refletindo, deste modo, a porosidade da pasta de cimento aderida.

O método de composição adoptado exigiu apenas um ajuste simples da relação água / cimento. Os resultados obtidos mostram que o betão que contém até 30% de AGRB pode ser utilizado numa vasta gama de aplicações da engenharia de alto desempenho e que as propriedades de durabilidade foram semelhantes às dos betões de referência. No entanto, observa-se que a retracção e a fluência aumentam com a quantidade de agregados reciclados presentes na mistura.

Os investigadores concluíram que AGRB provenientes de resíduos da pré-fabricação podem ser utilizados em betões de elevado desempenho.

Contudo, salientam que a adequação de agregados reciclados com origens diferentes necessita de ser avaliada individualmente. Apesar disto, segundo os autores, é importante reconhecer que existe uma necessidade de introduzir novos padrões de agregados reciclados e os valores obtidos demonstram que estes materiais podem ser usados com

êxito na prática numa gama de condições de exposição.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) estudaram os efeitos da incorporação de ARB finos e grossos provenientes de betão demolido com média / alta resistência (35-70 MPa) no desempenho de BED.

Constataram que as propriedades do betão de origem condicionaram significativamente as propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados. O procedimento utilizado na composição do betão reciclado foi muito semelhante ao do betão de referência, tendo sido apenas feitas correções na quantidade de água para obter uma trabalhabilidade adequada. No entanto, as variações na relação a/c foram pequenas.

Verificou-se que, não substituindo a fração 0-2 mm, as propriedades do betão reciclado são sempre melhores e que estas também são melhoradas através da introdução de superplastificantes e de sílica de fumo.

Os resultados mostram que os betões com agregados reciclados apresentam maior resistência à compressão quando AR de alta resistência são utilizados. No que respeita à resistência à tracção, as misturas contendo apenas agregados naturais apresentam valores superiores, mas as diferenças não são maiores do que 10% aos 28 dias. A influência de adjuvantes na resistência à tracção é muito maior do que a influência da introdução de agregados reciclados.

Quanto à resistência gelo / degelo, concluiu-se que BED feito a partir de agregados reciclados, quando submetido a acção de gelo / degelo, apresentam idêntica ou melhor durabilidade do que o betão de referência. Esta conclusão é apoiada por testes padrão constituídos por 50 ciclos de 24 horas (ar-congelamento e água-descongelamento).

Os ensaios de longo prazo mostraram maior retracção e menor fluência no betão reciclado, em relação ao betão constituído apenas por agregados naturais de resistência similar.

No trabalho de Gonzalez et Etxeberria (2014), foram utilizados AGRB obtidos a partir de trituração de três betões de origem distintos, com resistências à compressão de 40, 60 e 100MPa. Nesse estudo, foram fixadas taxas de substituição de 20, 50 e 100% de agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados de betão. Foram avaliadas as propriedades mecânicas e de durabilidade de BED e os resultados obtidos foram comparados com os de um betão de referência.

Relativamente às propriedades físicas, os betões incorporando 100% de ARB conseguiram alcançar propriedades semelhantes à do betão de referência, quando os AR eram provenientes do betão com resistência de 100 MPa. Verificou-se que, quanto mais baixa a qualidade dos ARB, maior a capacidade de absorção e o volume de vazios, afectando,

deste modo, as propriedades finais do betão.

Nas propriedades mecânicas, constata-se que, todos os betões utilizando agregados reciclados provenientes dos BO de 60 e 100MPa atingiram, para a máxima taxa de substituição, resistências idênticas às do betão de referência. Contudo, para os AR com origem no betão de 40 MPa, esta situação ocorreu apenas para as taxas de 20 e 50%. O comportamento semelhante dos BARB relativamente ao betão de referência foi justificado pela baixa relação a/c e por uma força de ligação mais adequada dos agregados reciclados. Verificou-se que a quantidade e qualidade de agregados reciclados de betão tinham pouca influência na resistência à tração e resistência à flexão do betão, comparativamente ao BED de referência. O maior impacto negativo do uso de ARB, devido à sua maior porosidade, ocorreu no módulo de elasticidade.

No que respeita à durabilidade, os BED com agregados reciclados apresentaram novamente valores muito idênticos aos do BED de referência, devido à baixa relação a/c usada nas diferentes misturas. Na resistência à penetração de cloretos, o betão incorporando 50% de AGRB (obtidos a partir da trituração do betão mínimo 40 MPa) conseguiu valores semelhantes ao do betão de referência. No entanto, para a taxa de substituição de 100%, registou-se uma redução no desempenho. Deste modo, o estudo conclui que agregados reciclados provenientes de betões de origem com uma gama de resistência média / alta podem ser utilizados com sucesso em BED.

No trabalho desenvolvido por Tu et al. (2006), verifica-se que características básicas como a massa volúmica, a capacidade de absorção, a granulometria e a resistência ao desgaste de agregados reciclados são geralmente piores do que as dos de agregados naturais, devido, como referido, à argamassa residual e a impurezas. Relativamente às propriedades do betão no estado fresco, constata-se que misturas utilizando agregados reciclados cumprem os requisitos iniciais de abaixamento relativos a BED mas, no entanto, após uma hora têm uma perda de abaixamento, devido à alta absorção dos agregados reciclados.

Neste estudo, observa-se ainda que, qualquer que seja o agregado reciclado utilizado no fabrico de BED, a tendência de propriedades como resistividade, propagação de ultra-sons e penetração de cloretos é muito idêntica à de BED convencional.

### **3. Considerações finais**

Através do estado da arte realizado, conclui-se que a presença de argamassa nos agregados reciclados de betão é uma das principais razões para que ocorram perdas de quali-



dade, comparativamente com os agregados naturais. Desta forma, os ARB são caracterizados como tendo menor massa volúmica, mais elevada absorção de água e menor resistência mecânica do que os AN. Estas propriedades estão muito condicionadas pela qualidade do betão de origem, sendo, no entanto, um aspecto pouco focado nos diferentes estudos. Na Tabela 15, são comparadas as propriedades de ARB de diferentes origens com as de agregados naturais.

**Tabela 15 - Comparação entre as propriedades de ARB de diferentes origens com AN**

Gonzalez e Etxeberria (2014)	Origem dos betões	Massa volúmica seca	Absorção de água	Índice de Los Angeles
	RCA 40 MPa	(-) 12 %	(+) 177 %	(+) 24 %
	RCA 60 MPa	(-) 8 %	(+) 130 %	(+) 29 %
	RCA 100 MPa	(-) 5 %	(+) 76 %	(+) 22 %

Constata-se que a influência do BO dos agregados reciclados é particularmente sentida na propriedade de absorção de água. Assim, a enorme variabilidade registada nos resultados de BARB dos vários estudos poderá estar relacionada com este facto. Os poucos dados existentes confirmam esta situação para a propriedade de resistência à compressão (Tabela 16). Deste modo, em Tabsh e Abdelfatah (2009), conclui-se que, para a mesma composição poderão existir variações de cerca de 30% entre BARB, caso se utilizem agregados reciclados provenientes de betões 30 ou 50 MPa. Este fenómeno parece ser atenuado quando se pretende atingir resistências à compressão superiores.

**Tabela 16 - Influência da origem dos AR no desempenho de betões (Tabsh e Abdelfatah, 2009)**

Origem dos agregados	Resistência à compressão alvo 30 MPa	Resistência à compressão alvo 50 MPa
BO 50 MPa	(-) 1 %	(-) 5 %
BO 30 MPa	(-) 30 %	(-) 11 %
BO Desconhecido	(-) 38 %	(-) 13%

No entanto, factores como o método de trituração dos AR parecem não ter um impacto tão significativo no desempenho dos futuros BARB (Tabela 17). Registam-se, devido ao processo de trituração, diferenças máximas de 2 e 4% nos estudos de Matias et al. (2013) e Nagatakia et al. (2004).

**Tabela 17 - Influência da TP+TS no desempenho de betões (Matias et al. 2013; Nagatakia et al. 2004)**

Autor	Resistência à compressão
Matias et al. (2013)	(+) 2,0 %
Nagatakia et al. (2004)	(+) 4,3 %

Através dos valores obtidos em vários trabalhos, na Tabela 18, efectuou-se uma síntese da influência da incorporação de agregados reciclados (para a taxa de substituição de

100%) nas propriedades dos betões. Como referido, observa-se uma elevada variância, com valores de desvios-padrão superiores à média.

**Tabela 18 - Influência de ARB no desempenho de betões em diferentes investigações**

Propriedades	AFRB	AGRB	Estudos
Resistência à compressão	(-) 24,3 % (S = 14,4)	(-) 13,8 % (S = 4,0)	AFRB - Khatib (2005); Sim e Park (2011); Evangelista (2007). AGRB - Rao et al. (2011); Tabsh et Abdelfatah (2009); Rahal (2007); Etxeberria et al. (2007); Poon CS et al. (2004).
Resistência à tracção diametral	(-) 4,0 % (S = 26,9)	(-) 11,0 % (S = 14,1)	AFRB - Leite (2001); Evangelista (2007). AGRB - Rao et al. (2011); Tabsh et Abdelfatah (2009); Yang et al. (2011); Etxeberria et al. (2007).
Módulo de elasticidade	(-) 20,3 % (S = 2,3)	(-) 42,8 % (S = 28,6)	AFRB - Khatib (2004); Solyman (2005); Evangelista (2007). AGRB - Etxeberria et al. (2007); Rao et al. (2011); Xiao et al. (2005); Topçu (1995).
Absorção de água por imersão	(+) 55,0 % (S = 14,1)	(+) 35,3 % (S = 2,5)	AFRB - Levy (2001); Evangelista (2010). AGRB - Thomas et al. (2013); Rao et al. (2011); Levy e Helene (2004)
Absorção de água por capilaridade	(+) 56,5 % * (S = 61,5)	(+) 80,0 % (S = 7,1)	AFRB - Zega e Di Maio (2011); Evangelista (2010). AGRB - Kou e Poon (2012); Gonçalves et al. (2004)
Resistência à carbonatação	(-) 26,3 % (S = 38,2)	(-) 24,7 % (S = 37,2)	AFRB - Levy (2001); Evangelista (2010). AGRB - Levy e Helene (2004); Kou e Poon (2012); Limbachiya et al. (2012).
Resistência cloretos	(-) 35,0 % (S = 1,4)	(-) 18,7 % (S = 11,7)	AFRB - Levy (2001); Solyman (2005); Evangelista (2010). AGRB - Rao et al. (2011); Kou e Poon (2012); Limbachiya et al. (2012).

\* Para uma taxa de substituição de 30%.

Nesses estudos, verificam-se diminuições de resistência à compressão em BARB até 35%. Estes resultados são justificados pelo aumento da relação a/c, necessária para se obterem trabalhabilidades semelhantes (devido à elevada absorção de água do material reciclado), e pela sua forma achatada e angulosa. A nível mecânico, o módulo de elasticidade parece ser a propriedade mais afectada. Por exemplo, Topçu (1995) verificou uma diminuição de 80%. Estes fracos desempenhos estão relacionados com a baixa rigidez dos agregados reciclados utilizados.

Relativamente à durabilidade em BARB, constata-se aumentos significativos nas propriedades de absorção de água por imersão e capilaridade. As causas são atribuídas à elevada absorção dos agregados reciclados e ao crescimento da porosidade com o aumento da taxa de substituição de AN por AR, uma vez que estes agregados são substancialmente mais porosos.

Na resistência à carbonatação, os resultados obtidos foram contraditórios, tanto em finos como grossos. Em betões incorporando AGRB, Levy et Helene (2004) observaram aumentos de 3% e Kou et Poon (2012) perdas de desempenho de 67%. No que respeita

aos AFRB, Levy (2001) obteve um aumento de 1% enquanto Evangelista (2010) registou uma diminuição de 70%. Seria expectável que os BAR, por terem uma maior absorção e índice de vazios, apresentassem uma frente de carbonatação mais profunda. No entanto, segundo Barra (1996), os produtos químicos formados nas reacções de carbonatação actuam de alguma forma como retardadores deste fenómeno, independentemente da taxa de AR usada.

Também a resistência à penetração de cloretos se degrada com a incorporação de ARB. Regista perdas máximas de 32% para AGRB (Amorim et al., 2012) e 36% para AFRB (Levy, 2001). Os valores são justificados pela maior permeabilidade destes betões.

Relativamente a betões de elevado desempenho incorporando ARB, o panorama observado é animador (Tabela 19).

**Tabela 19 - Influência de ARB no desempenho de BED em diferentes investigações**

Influência de ARB no desempenho de BED				
Autor	Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002)	Gonzalez et Etxeberria (2014)	Limbachiya et al. (2000)	
Tipo de substituição	AFRB e AGRB	AGRB	AGRB	
Taxa de substituição	100 %	100 %	100 %	
Tipo de BO	60 MPa	100 MPa	60 MPa	
Propriedades	Resistência à compressão	(+) 3,7 %	(+) 8,5 %	(-) 2,9 %
	Resistência à tracção por compressão diametral	0,0 %	(-) 0,2 %	-
	Módulo de elasticidade	(-) 19,4 %	(-) 8,5 %	(-) 3,5 %
	Absorção de água por capilaridade (48 horas)	-	(-) 15,4 %	-
	Penetração de cloretos	-	(+) 44,4 %	(-) 18,4 %
	Resistividade eléctrica	-	(-) 35,4 %	-
	Retracção	(+) 43,6 %	-	(+) 9,3 %
	Fluência	(-) 17,2 %	-	(+) 33,3 %

Assim, quando agregados reciclados de alta resistência são utilizados, verificam-se desempenhos mecânicos idênticos aos BED de referência. Em termos de durabilidade, os resultados apresentam maior variabilidade. Nesta área, serão necessários estudos adicionais para se promover a utilização de ARB em BED, sem reservas quanto ao seu desempenho.

#### 4. Bibliografia

**Aïtcin, P.C.** - The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 25. N.º 4-5. 2003. pp. 409-420.

**Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, Alina.** - Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24. 2002. pp. 269-79.

**Alexander, M.G.; Mindess, S.** - Aggregates in concrete London. New York: Taylor & Francis. 2005.

**Amorim, P.; de Brito, J.; Evangelista, L.** - Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability. *ACI Materials Journal*. Vol. 109. N.º 2. 2012. pp. 195-204.

**Bairagi, N.K.; Kishore, R.; Pareek, V.K.** - Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 9. N.º 1-2. 1993. pp. 109-126.

**Barra, M.** - Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona 1996.

**Bartlett, F.M.; Macgregor, J.G.** - Effect of moisture condition on concrete core strengths. *ACI Materials Journal*. Vol. 91. N.º 3. 1994. pp. 227-236.

**Bharatkumar, B.H.; Narayanan, R.; Raghuprasad, B.K.; Ramachandramurthy, D.S.** - Mix proportioning of high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 23. N.º 1. 2001. pp. 71-80.

**Brito, J.** - Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões. Lição de síntese para provas de agregação em Engenharia Civil. Lisboa 2005.

**Building Contractors Society of Japan** - Committee on disposal and reuse of construction waste. 1981.

**Coutinho, A.; Gonçalves, A.** - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II, III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa 1997.

Demolition and reuse of concrete and masonry; (2) Reuse of demolition waste. In: Kasai Y, editor. *Proceedings RILEM Symposium*. Tokyo: Chapman and Hall 1998. 774 p.

**Dhir, R.K.; Limbachiya, M.C.** - Suitability of recycled aggregate for use in BS5328 designated mixes. *Proceedings - Institution of Civil Engineers*. Vol. 134. N.º 3. 1999. pp. 257-274.

**Etxeberria, M.; Vazquez, E; Mari, A; Barra, M.** - Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37. N.º 5. 2007. pp. 735-742.

**Evangelista, L.; de Brito, J.** - Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32. N.º 1. 2010. pp. 9-14.

**Evangelista, L.; de Brito, J.** - Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29. N.º 5. 2007. pp. 397-401.

**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*. Vol. 63. N.º 8. 2011. pp. 617-27.

**Frondestou-Yannas, S.** - Waste concrete as aggregate for new concrete. *American Concrete Institute Journal. Proc.* Vol. 74. N.º 8. 1977. pp. 373-376.

**Gomes, M.** - Betões estruturais com incorporação de agregados reciclados de betão e cerâmicos com reboco. *Dissertação de Mestrado em Construção*. Instituto Superior Técnico, Lisboa 2007.

**Gonçalves, A.; de Brito, J.; Santos, J.; Branco, F.** - Resistência à compressão de betões produzidos com agregados grossos reciclados de betão. *IST*. Lisboa 2001. pp. 903-910.

**Gonçalves, A.; Esteves, A.; Vieira, M.** - Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. *RILEM Proceedings PRO 40: use of recycled materials in buildings and structures*. 2004.

**Gonzalez, A.; Etxeberria, M.** - Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 52. 2014. pp. 227-235.

**Hansen, T.** - Recycling of demolished concrete and masonry. Report of technical committee 37-DRC. *Demolition and Reuse of Concrete*. Taylor & Francis. London 1992.

**Hansen, T.C.** - Recycled aggregates and recycled-aggregate concrete: state-of-the-art report developments 1945–1985. *RILEM Technical Committee-37-DRC. Materials and Structures*. Vol. 19. N.º 111. 1986. pp. 201-46.

**Hansen, T.C.; Boegh, E.** - Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *American Concrete Institute Journal*. Vol. 82. N.º 5. 1985. pp. 648-652.

**Hansen, T.C.; Narud, H.** - Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International: Design and Construction*. Vol. 5. N.º 1. 1983. pp. 79-83.

**Hasaba, S.; Kawamura, M.; Kazuyuk, I.T.; Kunio, T.** - Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled concrete aggregates. Japan Concrete Institute. Vol. 3. 1981. pp. 55-60.

**Khatib, J. M.** - Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research. Vol. 35. N.º 4. 2005. pp. 763-769.

**Kikuchi, M.; Dosho, Y.; Narikawa, M.; Miura, T.** - Application of recycled concrete aggregate concrete for structural concrete. Part 1: Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Exploiting wastes in concrete: Proceedings of the international seminar held at the University of Dundee. Thomas Telford 1998.

**Kou, S.C.; Poon, C.S.** - Enhancing the durability properties on concrete prepared with coarse recycled aggregate. Construction and Building Materials. Vol. 35. 2012. pp. 69-76.

**Kou, S.C.; Poon, C.S.** - Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. Construction and Building Materials. Vol. 23. N.º 8. 2009. pp. 2877-2886.

**Kwan, W.H.; Ramli, M.; Kam, K.J.; Sulieman, M.Z.** - Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Construction and Building Materials. Vol. 26. N.º 1. 2012. pp. 565-573.

**Lauritzen, E.K.** - Demolition and recycling of a reinforced concrete bridge during construction of the Great Belt Link in Denmark. In: Rossmannith HP, editor. Proceedings of the Second International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock. Vienna: E&FN SPON, 1993. pp. 292-306.

**Leite, M.** - Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2001.

**Levy, S. M.; Helene, P.** - Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research. Vol. 34. N.º 11. 2004. pp. 1975-1980.

**Lim, C.H.; Yoon, Y.S.; Kim, J.H.** - Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 34. N.º 3. 2004. pp. 409-420.

**Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; Dhir, R.K.** - Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. Materials and Structures. Vol. 33. 2000. pp. 574-80.

**Limbachiya, M.C.; Meddah, M.S.; Ouchagour, Y.** - Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 27. N.º 1. 2012. pp. 439-449.

**Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A.; Pedro, D.** - Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*. Vol. 44. 2013. pp. 101-109.

**Mehta, P.K.; Aïtcin, P.C.** - Principals underlying the production of high performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*. ASTM. Vol. 12. N.º 2. 1990. pp. 70-78.

**Movassaghi, R.** - Durability of reinforced concrete incorporating recycled concrete as aggregate (RCA). Master of Applied Science in Mechanical Engineering Research Thesis. University of Waterloo, Ontario 2006.

**Nagatakia, S.; Gokceb, A.; Saekic, T.; Hisada, M.** - Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. N.º 6. 2004. pp. 965-971.

**Neville, A. M.** - *Properties of Concrete*. Pitman. London 1981.

**NP EN 206-1** - Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ. Lisboa 2005.

**Olorunsogo, F.T.; Padayachee, N.** - Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*. Vol. 32. 2002. pp. 179-85.

**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*. Vol. 28. N.º 1. 2011. pp. 722-9.

**Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L.; Fok, H; Kou, S.C.** - Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34. N.º 1. 2004. pp. 31-36.

**Rahal, K.** - Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*. Vol. 42. N.º 1. 2007. pp. 407-415.

**Rao, M.C.; Bhattacharyya, S.K.; Barai, S.V.** - Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*. Vol. 44. 2011. pp. 205-20.

**Ravindrarajah, R.S.; Tam, C.T.** - Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 37. N.º 130. 1985. pp. 29-38.

**Salem, R.M.; Burdette, E.G.** - Role of chemical and mineral admixture on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete. *ACI Materials Journal*. Vol. 95. N.º 5. 1998. pp. 558-563.

**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*. 31<sup>st</sup> edition. 2011. pp.2352-2360.

**Solyman, M.** - Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel. Kassel 2005.

**Tabsh, S.W.; Abdelfatah, A.S.** - Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 23. 2009. pp. 1163-7.

**Thomas, C.; Setién, J.; Polanco, J.A; Alaejos, P.; Sánchez, M.** - Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 40. 2013. pp. 1054-1065.

**Topçu, I.B.** - Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25. N.º 7. 1995. pp. 1385-1390.

**Tu, T.Y.; Chen, Y.Y.; Hwang, C.L.** - Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 36. N.º 5. 2006. pp. 943-950.

**Xiao, J.; Li, J.; Zhang, C.** - Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35. 2005. pp. 1187-1194.

**Yang, J.; Du, Q.; Bao, Y.** - Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*. Vol. 25. 2011. pp. 1935-1945.

**Zega, C. J.; Di Maio, A. A.** - Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*. 31<sup>st</sup> edition. Vol. 23. N.º 5. 2011. pp. 2336-2340.

**Zia, P.**- Preface. *High performance concrete in severe environments*. ACI SP-140. Paul Zia ed. (1993)

**Zia, P.; Ahmad, S.; Leming, M.** - High-performance concrete: a state-of-art report. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. 1991. 251 p.



Lisboa, 13 de Janeiro de 2014

Autores

Diogo Pedro  
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito  
Professor Catedrático

Luís Evangelista  
Professor Adjunto

Pedro Silva  
Professor Adjunto