



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO

PROJECTO FCT  
PTDC / ECM / 118372 / 2010



## Tarefa 4

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

BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS COM AGREGADOS RECICLADOS. ESTADO DA ARTE

RELATÓRIO

Março de 2015

Financiamento FCT/POCTI



União Europeia

FEDER



Governo da República Portuguesa

**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>2</b>
2.1. Descrição geral das campanhas experimentais	2
2.2. Propriedades do BAC com AR	13
2.2.1. Propriedades do BAC com AR no estado fresco	14
2.2.2. Propriedades do BAC com AR no estado endurecido	41
<b>3. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>67</b>
<b>4. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>70</b>

## Índice de figuras

Figura 1 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Corinaldesi et al., 2002).....	15
Figura 2 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Corinaldesi et al., 2002).....	16
Figura 3 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Corinaldesi et al., 2004).....	16
Figura 4 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Corinaldesi et al., 2004).....	17
Figura 5 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Kou e Poon, 2009).....	17
Figura 6 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Grdic et al., 2010).....	18
Figura 7 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Grdic et al., 2010) .....	18
Figura 8 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Safiuddin et al., 2011).....	19
Figura 9 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Safiuddin et al., 2011).....	19
Figura 10 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Tuyan et al. 2014).....	20
Figura 11 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Tuyan et al. 2014) .....	20
Figura 12 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Pereira-de-Oliveira et al., 2014) .....	21
Figura 13 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Modani e Mohitkar, 2014) .....	22
Figura 14 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Modani e Mohitkar, 2014) .....	22
Figura 15 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Güneyisi et al., 2014).....	23
Figura 16 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Güneyisi et al., 2014).....	23

Figura 17 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Uygunoğlu et al., 2014) .....	24
Figura 18 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Uygunoğlu et al., 2014).....	24
Figura 19 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Kebaïli et al., 2015).....	25
Figura 20 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Kebaïli et al., 2015).....	25
Figura 21 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Herbudiman e Saptaji, 2013).....	26
Figura 22 - Comparação dos resultados do ensaio de espalhamento (diâmetro de espalhamento).....	26
Figura 23 - Comparação dos resultados do ensaio de espalhamento (SF no BAC de referência e os SF nos BAC com AR) .....	27
Figura 24 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Corinaldesi et al., 2004).....	28
Figura 25 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Safiuddin et al., 2011).....	28
Figura 26 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Tuyan et al. 2014) .....	28
Figura 27 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Pereira-de-Oliveira et al., 2014) .....	29
Figura 28 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Modani e Mohitkar, 2014) .....	29
Figura 29 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Güneyisi et al., 2014).....	30
Figura 30 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de escoamento no funil V (Safiuddin et al., 2011).....	30
Figura 31 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de escoamento no funil V (Tuyan et al., 2014).....	30
Figura 32 - Comparação dos resultados do ensaio de escoamento no funil V (tempo de funil).....	31
Figura 33 - Comparação dos resultados do ensaio de escoamento no funil V (quociente entre o $T_v$ no BAC de referência e o $T_v$ no BAC com AR).....	31

Figura 34 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Corinaldesi et al., 2002).....	32
Figura 35 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Corinaldesi et al., 2004).....	32
Figura 36 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Kou e Poon, 2009).....	33
Figura 37 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Grdic et al., 2010).....	33
Figura 38 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Tuyan et al. 2014).....	34
Figura 39 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Modani e Mohitkar, 2014).....	34
Figura 40 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Güneyisi et al., 2014).....	35
Figura 41 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Kebaïli et al., 2015).....	35
Figura 42 - Comparação dos resultados do ensaio de escoamento na caixa L (índice de passagem).....	36
Figura 43 - Comparação dos resultados do ensaio na caixa L (quociente entre o PL no BAC de referência e o PL no BAC com AR).....	36
Figura 44 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (Kou e Poon, 2009).....	37
Figura 45 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (Grdic et al. 2010).....	37
Figura 46 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (Safiuddin et al., 2011).....	38
Figura 47 - Comparação dos resultados do ensaio de segregação no peneiro (índice de segregação).....	38
Figura 48 - Comparação dos resultados do ensaio de segregação no peneiro (quociente entre o SR no BAC de referência e o SR no BAC com AR).....	39
Figura 49 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (Safiuddin et al., 2011).....	40

Figura 50 - Resultados do ensaio de espalhamento (espalhamento sem obstruções) e do ensaio de espalhamento no anel J (espalhamento com obstruções): diâmetro de espalhamento (Uygunoğlu et al., 2014) .....	40
Figura 51 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento em anel J (Safiuddin et al., 2011).....	41
Figura 52 - Massa volúmica aos 7 e 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014) .....	42
Figura 53 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Corinaldesi et al., 2002) .....	43
Figura 54 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Corinaldesi et al., 2004) .....	43
Figura 55 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Tuyan et al. 2014) ...	44
Figura 56 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014) .....	44
Figura 57 - Resistência à compressão aos 1, 3, 7, 14 e 28 (Corinaldesi et al., 2002).....	45
Figura 58 - Resistência à compressão aos 1, 3, 7 e 28 (Corinaldesi et al., 2004).....	45
Figura 59 - Resistência à compressão (em cubos) para $a/c=0,53$ (1ª família) aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias (Kou e Poon, 2009).....	46
Figura 60 - Resistência à compressão (em cubos) para $a/c=0,44$ (2ª família) aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias (Kou e Poon, 2009).....	46
Figura 61 - Resistência à compressão (em cubos) para $a/c=0,44$ ; 0,40; 0,35 para 100% de taxa de substituição (3ª família) aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias (Kou e Poon, 2009).....	47
Figura 62 - Resistência à compressão em cubos aos 2, 7 e 28 dias (Grdic et al., 2010). 48	
Figura 63 - Resistência à compressão em cubos e em cilindros aos 7, 28 e 90 dias (Panda e Bal, 2013).....	48
Figura 64 - Resistência à compressão em cubos aos 28 dias (Tuyan et al. 2014).....	49
Figura 65 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)49	
Figura 66 - Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias (Modani e Mohitkar, 2014) .....	50
Figura 67 - Resistência à compressão aos 28 e 90 dias (Güneyisi et al., 2014) .....	50
Figura 68 - Resistência à compressão aos 28 dias (Herbudiman e Saptaji, 2013) .....	51
Figura 69 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014) .....	52
Figura 70 - Diagrama tensão-deformação do BAC com AGN (Uygunoğlu et al., 2014) .....	52

Figura 71 - Diagrama tensão-deformação do BAC com AGR (Uygunoğlu et al., 2014)	52
Figura 72 - Diagrama tensão-deformação do BAC com AGM (Uygunoğlu et al., 2014)	52
Figura 73 - Comparação dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias	53
Figura 74 - Comparação dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias (resistência à compressão no BAC de referência e as resistências à compressão nos BAC com AR)	53
Figura 75 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Kou e Poon, 2009)	54
Figura 76 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 7, 28 e 90 dias (Panda e Bal, 2013)	55
Figura 77 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Tuyan et al. 2014)	55
Figura 78 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Modani e Mohitkar, 2014)	56
Figura 79 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 90 dias (Güneyisi et al., 2014)	56
Figura 80 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014)	57
Figura 81 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Herbudiman e Saptaji, 2013)	57
Figura 82 - Comparação dos resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias	57
Figura 83 - Comparação dos resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (quociente entre a resistência à tracção no BAC de referência e a resistência à tracção no BAC com AR)	58
Figura 84 - Resistência à tracção por flexão aos 28 dias (Grdic et al., 2010)	59
Figura 85 - Resistência à tracção por flexão aos 7, 28 e 90 dias (Panda e Bal, 2013)	59
Figura 86 - Comparação dos resultados de resistência à tracção por flexão aos 28 dias	60
Figura 87 - Comparação dos resultados de resistência à tracção por flexão aos 28 dias (quociente entre a resistência à tracção no BAC de referência e a resistência à tracção no BAC com AR)	60

Figura 88 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 7 e 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014) .....	61
Figura 89 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014) .....	61
Figura 90 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (Tuyan et al. 2014) .....	62
Figura 91 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (Modani e Mohitkar, 2014) .....	63
Figura 92 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014) .....	63
Figura 93 - Absorção de água por imersão aos 28 dias (Grdic et al., 2010) .....	64
Figura 94 - Carga passada aos 28 dias (Kou e Poon, 2009).....	64
Figura 95 - Carga passada aos 28 dias (Tuyan et al. 2014).....	65
Figura 96 - Profundidade da frente de carbonatação aos 28 dias (Modani e Mohitkar, 2014) .....	65
Figura 97 - Extensão total da retracção ao longo do tempo para as misturas da 1ª família (Kou e Poon, 2009) .....	66
Figura 98 - Extensão total da retracção ao longo do tempo para as misturas da 2ª família (Kou e Poon, 2009) .....	66
Figura 99 - Extensão total da retracção ao longo do tempo para as misturas da 3ª família (Kou e Poon, 2009) .....	67



## Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos AR (Corinaldesi et al., 2002).....	2
Tabela 2 - Composição das amassaduras (Corinaldesi et al., 2002).....	3
Tabela 3 - Propriedades dos agregados (Corinaldesi et al., 2004).....	3
Tabela 4 - Composição das amassaduras (Corinaldesi et al., 2004).....	3
Tabela 5 - Propriedades dos agregados (Kou e Poon, 2009).....	4
Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos AFR e da aria de rio (Kou e Poon, 2009)....	4
Tabela 7 - Composição das amassaduras (Kou e Poon, 2009).....	4
Tabela 8 - Quantidade real de água adicionada às amassaduras (Kou e Poon, 2009) .....	4
Tabela 9 - Propriedades dos agregados (Grdic et al., 2010).....	5
Tabela 10 - Distribuição granulométrica dos agregados (Grdic et al., 2010) .....	5
Tabela 11 - Composição das amassaduras (Grdic et al., 2010).....	5
Tabela 12 - Propriedades dos agregados (Safiuddin et al., 2011) .....	5
Tabela 13 - Composição das amassaduras (Safiuddin et al., 2011).....	6
Tabela 14 - Propriedades dos agregados (Panda e Bal, 2013) .....	6
Tabela 15 - Propriedades dos agregados (Tuyan et al., 2014).....	6
Tabela 16 - Distribuição granulométrica dos agregados (Tuyan et al., 2014) .....	7
Tabela 17 - Composição das amassaduras (Tuyan et al., 2014).....	7
Tabela 18 - Propriedades dos agregados (Pereira-de-Oliveira et al., 2014).....	7
Tabela 19 - Composição das amassaduras (Pereira-de-Oliveira et al., 2014).....	8
Tabela 20 - Propriedades dos agregados (Modani e Mohitkar, 2014).....	8
Tabela 21 - Composição das amassaduras (Modani e Mohitkar, 2014) .....	8
Tabela 22 - Distribuição granulométrica dos agregados (Güneyisi et al., 2014) .....	9
Tabela 23 - Propriedades dos agregados (Güneyisi et al., 2014) .....	9
Tabela 24 - Propriedades dos agregados reciclados com diferentes tipos de tratamento da superfície (Güneyisi et al., 2014) .....	9
Tabela 25 - Composição das amassaduras (Güneyisi et al., 2014).....	9
Tabela 26 - Propriedades dos agregados (Uygunoğlu et al., 2014) .....	10
Tabela 27 - Distribuição granulométrica dos agregados (Uygunoğlu et al., 2014).....	10
Tabela 28 - Composição das amassaduras (Uygunoğlu et al., 2014) .....	10
Tabela 29 - Propriedades dos agregados (Kebaïli et al., 2015).....	11
Tabela 30 - Composição das amassaduras (Kebaïli et al., 2015) .....	11
Tabela 31 - Propriedades dos agregados (Herbudiman e Saptaji, 2013) .....	12

Tabela 32 - Composição das amassaduras (Herbudiman e Saptaji, 2013) .....	12
Tabela 33 – Resumo qualitativo dos diferentes materiais usados na produção do BAC	13
Tabela 34 - Influência dos AGR e AFR no desempenho de BAC (estado fresco) em diferentes investigações .....	68
Tabela 35 - Influência dos AGR e AFR no desempenho de BAC (estado endurecido) em diferentes investigações (propriedades mecânicas avaliadas aos 28 dias de idade do BAC). .....	69
Tabela 36 - Influência dos AGR e AGR no desempenho de BAC (estado endurecido) em diferentes investigações (propriedades de durabilidade avaliadas aos 28 dias de idade do BAC). .....	70

## Abreviaturas

a/c	Relação água / cimento
AF	Agregado fino
AG	Agregado grosso
AN	Agregado natural
AFN	Agregado fino natural
AGN	Agregado grosso natural
AR	Agregado reciclado
AFR	Agregado fino reciclado
AGM	Agregado grosso de mármore
AGR	Agregado grosso reciclado
BAC	Betão auto-compactável
BR	Betão de referência
EFNARC	European Federation of National Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products for Concrete
PJ	Capacidade de passagem no anel J
PL	Índice de capacidade de passagem na caixa L
S	Desvio padrão
SF	Diâmetro de espalhamento
Sp	Superplastificante
SR	Índice de segregação
T <sub>500</sub>	Tempo de espalhamento
T <sub>v</sub>	Tempo de escoamento ou tempo de funil
tp	Telha em pó

# 1. Introdução

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.

Neste relatório, é apresentado um estado da arte sobre a incorporação de agregados reciclados (AR) na produção de betão auto-compactável (BAC), no âmbito do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUSustainableCONcrete)”. Assim, foi realizada uma recolha de informação em artigos internacionais.

Em cada artigo, foi recolhida a seguinte informação:

- ◆ tipo e características físicas dos materiais utilizados na produção do BAC (tipo de cimento, origem, densidade, absorção de água dos agregados, entre outros tipos de informação);
- ◆ composição quantitativa das amassaduras;
- ◆ resultados dos ensaios;
- ◆ discussão e conclusões acerca dos ensaios.

Assim, inicialmente apresenta-se a descrição das campanhas experimentais realizadas pelos autores (§2.1). Em seguida, cada propriedade do BAC é analisada com base nos resultados obtidos pelos diferentes autores, no estado fresco (§2.2.1) e no estado endurecido (§2.2.1).

As propriedades a analisar no betão em estado fresco são as seguintes: fluidez, velocidade de escoamento na ausência de obstruções, viscosidade, capacidade de enchimento, capacidade de escoamento através de espaços confinados, resistência à segregação e capacidade de passagem através de espaços estreitos.

As propriedades a analisar no BAC em estado endurecido são as seguintes: massa volumica, velocidade de propagação de ultra-sons, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, resistência à tracção por flexão, módulo de elasticidade, permeabilidade ao oxigénio, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à penetração de cloretos e retracção.

A temática de BAC com AR é de grande relevância para a Sociedade, uma vez que esta cada vez mais exige que a indústria da construção adopte novos processos que minimizem os impactes negativos no meio ambiente. A utilização de AR para a produção de betão apresenta um grande benefício ambiental (poupança na extracção de agregado natural).

Uma das principais vantagens do betão auto-compactável é a sua capacidade de escoar e compactar apenas sob acção do seu próprio peso, encher a cofragem com as suas armaduras, tubos, negativos, etc., conservando a homogeneidade (NP EN 206-1, 2010). Por conseguinte, este tipo de betão não necessita de ser vibrado (ao contrário do betão convencional) promovendo assim um grande benefício ambiental, nomeadamente em termos de poupança de energia e ausência de ruído na sua colocação (APEB, 2007).

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Descrição geral das campanhas experimentais

Neste subcapítulo, é feita uma descrição das campanhas realizadas pelos autores. Para cada campanha experimental, são apresentadas as seguintes informações:

- ◆ características dos materiais usados na produção do BAC;
- ◆ origem dos agregados reciclados;
- ◆ composição quantitativa das amassaduras realizadas.

Em todas as campanhas, os autores produziram um BAC sem AR, designado por betão de referência (BR). Este betão permite ser comparado com os restantes BAC, produzidos com AR, em geral variando a percentagem de substituição de AN por AR.

Nas campanhas em análise, alguns autores produziram BAC com agregados finos reciclados (AFR) e agregados grossos reciclados (AGR) como substituição dos agregados finos naturais (AFN) e agregados grossos naturais (AGN): Kou e Poon (2009) e Corinaldesi et al. (2004). No entanto, a maioria dos autores produziu BAC apenas com AGR como substituto de AGN: Grdic et al. (2010), Panda e Bal (2013), Safiuddin et al. (2011), Tuyan et al. (2014), Pereira-de-Oliveira et al. (2014) e Güneyisi et al. (2014).

Todos os AR usados por estes autores provêm de resíduos de betão. Apenas Herbudiman e Saptaji (2013) usaram AFR proveniente de telhas; no entanto, este resíduo não foi usado como substituto de AFN, mas de cimento, dadas as suas propriedades pozolánicas.

Corinaldesi et al. (2002) estudaram BAC com incorporação de 100% de AGR (12 mm de dimensão máxima) e 100% de AFR (6 mm de dimensão máxima). O BAC foi preparado variando a relação a/c no intervalo de 0.35 a 0.40 e a adição de diferentes tipos de materiais muito finos (que passam no peneiro de 150 $\mu$ m) numa dosagem de 15% do peso de cimento. Os materiais muito finos usados foram cinzas volantes (CV), sílica de fumo (SF) e fíler calcário (FC) obtido a partir do processo de reciclagem de entulho. Os AR foram fornecidos por uma empresa de demolição nos quais os resíduos provenientes dos edifícios demolidos foram adequadamente tratados. Foi usado cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R. Apresenta-se na Tabela 1 as características dos AR e na Tabela 2 as composições das amassaduras realizadas.

Corinaldesi et al. (2004) estudaram BAC com introdução de AR e cinzas. Os AR foram obtidos a partir de entulho da construção civil, sendo devidamente seleccionado, limpo (remoção de terra) e peneirado. Os AR tinham a seguinte composição média: 70% de betão, 27% de alvenaria, 2% de betume e 1% de outros materiais não identificados. As cinzas foram obtidas a partir da inceneração de resíduos sólidos urbanos. O cimento usado foi o CEM II/ AL 42.5R. As características dos agregados usados são apresentadas na Tabela 3.

Foram realizadas três amassaduras: BAC de referência, sem adição de AR (SCC-REF); BAC com 25% de AGR (como substituto dos AGN) e AFR (usado como fíler) (SCC-

RP); e BAC com 25% AGR (como substituto dos AGN) e cinzas (usado como fíler) (SCC-MSWA). As composições das amassaduras são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 1 - Propriedades dos AR (Corinaldesi et al., 2002)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
AGR	15 mm	2320	8
AFR	6 mm	2150	10

**Tabela 2 - Composição das amassaduras (Corinaldesi et al., 2002)**

Amassadura	a/c	% de AGR e de AFR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )							
			Água	Cimento	Cinzas volantes	Sílica de fumo	Fíler calcário	AFR	AGR	Superplastificante
CV-0,40	0,40	100	205	500	80	-	-	316	967	8,75
CV-0,45	0,45		230	500	80	-	-	298	931	7,7
FC-0,40	0,40		205	500	-	-	80	316	967	10,4
SF-0,45	0,45		205	455	-	66	-	336	967	13

**Tabela 3 - Propriedades dos agregados (Corinaldesi et al., 2004)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia de rio	6 mm	2660	2,0
AGN	10 mm	2620	3,0
AGR	15 mm	2310	9,0

**Tabela 4 - Composição das amassaduras (Corinaldesi et al., 2004)**

Amassadura	a/c	% de AFR	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )							
				Água	Cimento	Cinzas	Areia de rio	AGN	AFR	AGR	Superplastificante
SCC-REF	0,45	-	-	180	400	-	880	880	-	-	4
SCC-RP		100	25	200	440	-	-	1107	100	382	8,8
SCC-MSWA		-	-	220	440	70	-	-	-	-	382

De forma a garantir a distribuição uniforme de agregados no BAC, os AG e AF foram combinados em 50%/50% (em volume) respectivamente no BAC de referência (SCC-REF) e 74%/26% (em volume) respectivamente nas restantes amassaduras (SCC-RP e SCC-MSWA).

No BAC de referência (REF), foi usado superplastificante (1% do peso de cimento) de forma a este atingir o espalhamento de, pelo menos, 200 mm. Nas restantes duas amassaduras (SCC-RP e SCC-MSWA), foi usado 2% e 1,5%, respectivamente, para obter um espalhamento no intervalo de 750 a 800 mm.

Kou e Poon (2009) estudaram BAC com incorporação de AGR e AFR. O estudo consistiu na produção de três tipos de famílias de BAC compostas por 100% de AGR e com diferentes percentagens de substituição de areia de rio por AFR. As amassaduras da 1ª e da 2ª família foram produzidas com diferentes percentagens de incorporação de AFR: 0, 25, 50, 75, 100%. A relação a/c usada foi de 0,53 (1ª família) e 0,44 (2ª família). A 3ª família foi produzida com 100% de AGR e AFR com relações a/c de 0,44, 0,40 e 0,35. A dosagem de cimento (tipo 1) foi mantida constante em todas as amassaduras realiza-

das, sendo utilizados dois tipos de cinzas volantes: f-FA (dimensão inferior a 45 µm, considerado como substituto do cimento) e r-FA (dimensão superior a 45 µm, considerado como agregado fino e substituto do moderador de viscosidade para controlar a segregação do BAC). As características dos agregados são apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6. Na Tabela 7, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 5 - Propriedades dos agregados (Kou e Poon, 2009)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	
			10 min	24 h
Areia	-	2620	0,36	0,88
AGR	10 mm	2490	2,84	4,26
	20 mm	2570	2,63	3,52
AFR	<5 mm	2300	6,05	11,86

**Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos AFR e da areia de rio (Kou e Poon, 2009)**

Dimensão do peneiro (mm)	5	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
% passado acumulado							
Areia de rio	100	96	87	70	26	2	0,1
AFR	100	85	62	53	30	8,1	3,6

**Tabela 7 - Composição das amassaduras (Kou e Poon, 2009)**

Amassadura	(a/c) <sub>ef</sub>	AFR (%)	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )								Superplastificante (ADVA-109) (l/m <sup>3</sup> )	Moderador de viscosidade (l/m <sup>3</sup> )
			Água	Cimento	Cinzas volantes (f-FA)	Cinzas volantes (r-FA)	Areia	AFR	AGR			
									10mm	20mm		
1ª F.	C-1	0	180	340	-	200	695	0	560	335	8,5	1,0
	RF25	25										
	RF50	50										
	RF75	75										
	RF100	100										
2ª F.	C-2	0	180	340	70	200	662	0	530	320	8,5	-
	RF25	25										
	RF50	50										
	RF75	75										
	RF100	100										
3ª F.	RF100A	0,44	180	340	70	200	0	581	530	320	8,5	-
	RF100B	0,40	165									
	RF100C	0,35	145									

As quantidades reais de água usadas nas misturas foram superiores às quantidades pré-estabelecidas (Tabela 7), devido à absorção de água dos agregados reciclados ser superior à dos agregados naturais (Tabela 8).

Grdic et al. (2010) estudaram BAC com incorporação de AGR. O estudo consistiu na produção de três tipos de BAC com diferentes percentagens de substituição de AN por AGR: 0, 50 e 100%. Em todas as amassaduras, as quantidades dos constituintes do BAC foram mantidas constantes, excepto a quantidade de água, com o objectivo de atingir igual consistência (valores de espalhamento); por conseguinte, a relação a/c das amassa-

duros foi de 0,41, 0,43 e 0,45. Os AGR tiveram origem numa ponte de betão (C37/45) com 40 anos de idade. As características dos agregados são apresentadas na Tabela 9 e na Tabela 10. Na Tabela 11, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 8 - Quantidade real de água adicionada às amassaduras (Kou e Poon, 2009)**

Amassadura 1ª família	Água (kg/m <sup>3</sup> ) (a/c) <sub>real</sub>	Amassadura 2ª família	Água (kg/m <sup>3</sup> ) (a/c) <sub>real</sub>	Amassadura 3ª família	Água (kg/m <sup>3</sup> ) (a/c) <sub>real</sub>
C-1	0,54	C-2	0,44	RF100A	0,59
RF25	0,58	RF25	0,48	RF100B	0,56
RF50	0,63	RF50	0,52	RF100C	0,52
RF75	0,67	RF75	0,55		
RF100	0,72	RF100	0,59		

**Tabela 9 - Propriedades dos agregados (Grdic et al., 2010)**

Material		Absorção de água (%)
AGR	4/8 mm	5,88
	8/16 mm	5,08

**Tabela 10 - Distribuição granulométrica dos agregados (Grdic et al., 2010)**

Dimensão do peneiro (mm)	31,5	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,71	0,5	0,25	0,125	
% passado acumulado													
Areia de rio	0/4 mm	100	100	100	100	94,05	72,6	46,84	33,02	17,3	7,31	0,81	0
AN	4/8 mm	100	100	100	99,56	89,41	3,13	0,28	0,1	0,07	0,05	0,04	0,03
	8/16 mm	100	99,92	97,26	30,21	1,37	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02
AGR	4/8 mm	100	100	100	99,91	98,99	1,95	0,44	0,33	0,31	0,27	0,18	0,04
	8/16 mm	100	100	99,17	51,28	10,58	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	0

**Tabela 11 - Composição das amassaduras (Grdic et al., 2010)**

Amassadura	a/c	AGR (%)	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )							Superplastificante (l/m <sup>3</sup> )	
			Água	Cimento	Fíler calcário	Areia de rio	AN		AGR		
							0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm		4-8 mm
E	0,41	0	170	409,6	260	676	429,6	429,6	-	-	4
P50	0,43	50	178				214,8	214,8	214,8	214,8	
P100	0,45	100	186				-	-	429,6	429,6	

Safiuddin et al. estudaram BAC com incorporação de agregados grossos reciclados. O estudo consistiu na produção de cinco tipos de BAC com diferentes percentagens de substituição de AN por AGR: 0, 30, 50, 70 e 100%. Em todas as amassaduras, as quantidades dos constituintes do BAC foram mantidas constantes (água, cimento e superplastificante). Os AGR tiveram origem em cubos com resistência de 50 MPa, com relação a/c = 0,40 e idade de 6 meses. As características dos agregados são apresentadas na Tabela 12. Na Tabela 13, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

Panda e Bal (2013) estudaram BAC com incorporação de AGR. O estudo constitui na produção de seis tipos de betões: um betão convencional (BC) apenas com AN e cinco tipos de BAC com diferentes percentagens de substituição de AN por AGR: 0, 10, 20,



30 e 40%. O BC foi projectado com um traço de 1:1,44:3,22 (cimento, areia e brita). Em todas as amassaduras, a relação a/c foi mantida constante: 0,47. Nas cinco amassaduras de BAC, foi introduzido superplastificante (0,6% da massa de cimento) e agente modificador da viscosidade (0,34% da massa de água). Os AGR tiveram origem numa laje de cobertura de um edifício com 25 anos de idade. As características dos agregados são apresentadas na Tabela 14.

**Tabela 12 - Propriedades dos agregados (Safiuddin et al., 2011)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia de rio	5 mm	1618,5	1,32
AGN	20 mm	1513	0,60
AGR		1366,2	1,91

**Tabela 13 - Composição das amassaduras (Safiuddin et al., 2011)**

Amassadura	a/c	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )					Superplastificante (% da massa de cimento)
			Água	Cimento	Areia de rio	AGN	AGR	
CR0	0,60	0	205	342	914	914	0	1,5
CR30		30			976,4	611,7	262,1	
CR50		50			870	435	435	
CR70		70			866,2	259,9	606,3	
CR100		100			860,5	0	860,5	

**Tabela 14 - Propriedades dos agregados (Panda e Bal, 2013)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia	-	1598	0,14
AGN	10/20 mm	1424	0,34
AGR	10/20 mm	1377	1,25

Tuyan et al. (2014) estudaram BAC com incorporação de AGR e AFR. O estudo consistiu na produção de três tipos de famílias de BAC compostas por diferentes percentagens de substituição de AGN (de origem calcária) por AGR. As três famílias foram produzidas com diferentes percentagens de incorporação de AGR: 0, 20, 40 e 60%. A relação a/c usada foi de 0,43 (1ª família), 0,48 (2ª família) e 0,53 (3ª família). A dosagem de cimento e de cinzas volantes foi mantida constante em todas as amassaduras realizadas, assim como a relação agregados grossos (AGN e AGR) / total de agregados (fíler calcário, AFN, AGN e AGR) foi de 0,45. As características dos agregados naturais e reciclados são apresentadas na Tabela 15 e na Tabela 16. Na Tabela 17, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 15 - Propriedades dos agregados (Tuyan et al., 2014)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
AFN	0-4 mm	1793	0,67
AGN	4-16 mm	1503	0,21
AGR	4-16 mm	1410	4,80

**Tabela 16 - Distribuição granulométrica dos agregados (Tuyan et al., 2014)**

Dimensão do peneiro (mm)	16	8	4	2	1	0,5	0,25
% passado acumulado							
AFN	100	100	100	75	53	27	14
AGN	100	42	2	0	0	0	0
AGR	100	55	2	0	0	0	0

**Tabela 17 - Composição das amassaduras (Tuyan et al., 2014)**

Amassadura	a/c	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )							
			Água	Cimen- to	Cinzas volantes	Filer calcário	AFN 0-4 mm	AGN 4-16 mm	AGR 4-16 mm	Superplasti- ficante
1 <sup>a</sup> F	C-43	0	194	315	135	162	738	745	-	4,9
	20-43	20						596	149	5,5
	40-43	40						447	298	5,7
	60-43	60						298	447	6,2
1 <sup>a</sup> 2	C-48	0	216	315	135	157	713	720	-	3,3
	20-48	20						576	144	3,4
	40-48	40						432	288	3,5
	60-48	60						288	432	3,7
3 <sup>a</sup> F	C-53	0	239	315	135	151	688	694	-	2,2
	20-53	20						555	139	2,4
	40-53	40						416	278	2,7
	60-53	60						278	416	3,0

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) estudaram BAC com incorporação de AGR. O estudo consistiu na produção de quatro tipos de BAC com diferentes percentagens de substituição de AN por AGR: 0, 20, 40 e 60%. Em todas as amassaduras, as quantidades de cimento (CEM 42,5R), filer calcário e areia de rio foram mantidas constantes, variando a quantidade de AGN, AGR, superplastificante e água. Foram usadas duas fracções de areia de rio (82% da areia com máxima dimensão de 1,2 mm e 18% da areia com máxima dimensão de 4,8 mm), duas fracções de AGN (68% de AGN com máxima dimensão de 9,5 mm e 32% de AGN com máxima dimensão de 19,0 mm) e duas fracções de AGR (90% de AGN com máxima dimensão de 9,5 mm e 10% de AGN com máxima dimensão de 19,0 mm). Os agregados foram previamente secos. Os AGR tiveram origem de uma central de reciclagem. As características dos agregados são apresentadas na Tabela 18. Na Tabela 19, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

Modani e Mohitkar (2014) estudaram BAC com incorporação de AGR. O estudo consistiu na produção de seis tipos de BAC com diferentes percentagens de substituição de AGN por AGR: 0, 20, 40, 60, 80 e 100%. Em todas as amassaduras, as quantidades dos constituintes do BAC foram mantidas constantes, excepto a quantidade de superplastificante (com o objectivo de obter igual espalhamento em todas as amassaduras, uma vez que ocorre maior absorção de água com o aumento de AGR). Também a relação a/c foi mantida constante: 0,53. Foi usado cimento Portland e sílica activa. Os AGR foram obtidos a partir de cubos produzidos em laboratório e posteriormente triturados. Os AGR foram imersos em água durante 24 horas e a sua superfície seca antes de serem

usados para a produção de BAC. As misturas foram concebidas com o objectivo de ser atingida a resistência à compressão de 30 MPa (aos 28 dias).

**Tabela 18 - Propriedades dos agregados (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia de rio	1,2 mm	2570	0,30
	4,8 mm	2610	0,40
AGN	9,5 mm	2710	0,15
	19 mm	2700	0,14
AGR	9,5 mm	2509	4,10
	19 mm	2485	4,05

**Tabela 19 - Composição das amassaduras (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)**

Amassadura	a/c	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )								Superplastificante (l/m <sup>3</sup> )	
			Água	Cimento	Fíler calcário	Areia de rio		AGN		AGR		
						1,2	4,8	9,5	19	9,5		19
SCC	0,57	0	161,3	284,9	370,2	597,6	133,2	550,0	257,9	-	-	3,4
SCC20	0,57	20	163,2					440,0	206,3	134,8	14,9	4,8
SCC40	0,56	40	160,7					330,0	154,8	269,6	29,7	4,6
SCC100	0,57	60	162,4					-	-	727,9	80,6	6,0

As características dos agregados são apresentadas na Tabela 20. Na Tabela 21, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 20 - Propriedades dos agregados (Modani e Mohitkar, 2014)**

Material		Densidade relativa	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia de rio	-	2,60	1690	0,84
AGN	12 mm	2,65	1614	1,31
AGR	12 mm	2,27	1356	5,64

**Tabela 21 - Composição das amassaduras (Modani e Mohitkar, 2014)**

Amassadura	a/c	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )					Superplastificante (l/m <sup>3</sup> )	
			Água	Cimento	Sílica de fumo	Areia de rio	AGN		AGR
							12 mm		12 mm
R0	0,53	0	185	348	115	970	804	0	4,6
R20		20					644	133	
R40		40					483	266	
R60		60					322	399	
R80		80					161	532	
R100		100					0	666	5,5

Güneyisi et al. (2014) estudaram o efeito de tratamento da superfície dos agregados nas propriedades do BAC, incorporando 100% de AGR em todas as misturas. Em todas as amassaduras, foram mantidas constantes a quantidade de água, cimento (CEM I 42.5N), cinzas volantes (substituição de 20% do cimento), areia de rio e AFN. O BAC foi preparado variando o tipo de tratamento dado ao agregado. Os métodos de tratamento da superfície dados aos agregados foram os seguintes:

- ◆ 1º tratamento (HCL): os agregados foram submersos em solução de ácido clorídrico durante 24 horas a 20 °C e posteriormente em água destilada (para remover a solução de ácido);
- ◆ 2º tratamento (WG): os agregados foram submersos em silicato de sódio durante 30 minutos, posteriormente mantidos em suspensão durante 10 minutos (para remover o excesso de silicato de sódio) e, finalmente, foram colocados na estufa durante 1 h (para evitar a colagem de agregados);
- ◆ 3º tratamento (TSM): previamente foi preparada uma mistura de cimento, água e cinzas volantes (misturado durante 1 minuto), em seguida, os agregados foram adicionados à mistura (misturado durante 1 minuto); finalmente, os restantes materiais da mistura para a produção do BAC foram adicionados (misturados durante 2 minutos);
- ◆ 4º tratamento (CSF): os agregados foram submersos em cimento e sílica de fumo durante 30 minutos e, em seguida, espalhados sobre o peneiro durante 24 horas; finalmente, foram imersos em água durante 28 dias.

Para além destas quatro amassaduras, foi produzida uma outra usando AR sem qualquer tipo de tratamento (RCA).

As características dos agregados são apresentadas na Tabela 22, na Tabela 23e na Tabela 24. Na Tabela 25, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 22 - Distribuição granulométrica dos agregados (Güneyisi et al., 2014)**

Dimensão do peneiro (mm)	16	8	4	2	1	0,5	0,25
% passado acumulado							
Areia de rio	100	99,7	94,5	58,7	38,2	24,9	5,4
AFN	100	100	99,2	62,9	43,7	33,9	22,6

**Tabela 23 - Propriedades dos agregados (Güneyisi et al., 2014)**

Material	Densidade relativa	Absorção de água (%)
Areia de rio	2,66	0,55
AFN	2,45	0,92

**Tabela 24 - Propriedades dos agregados reciclados com vários tipos de tratamento da superfície (Güneyisi et al., 2014)**

Material		Densidade relativa	Absorção de água às 24 h (%)
AR sem tratamento de superfície (RCA)	4-8 mm	2,43	8,72
	8-16 mm	2,45	7,66
Tratamento dos AR com ácido Clorídrico (RCA-HCL)	4-8 mm	2,45	6,99
	8-16 mm	2,46	6,84
Tratamento dos AR com silicato de sódio (RCA-WG)	4-8 mm	2,34	2,85
	8-16 mm	2,36	1,77
Mistura prévia de AR com areia, cimento e cinzas (RCA-TCM)	4-8 mm	2,2	8,24
	8-16 mm	2,21	7,35

**Tabela 25 - Composição das amassaduras (Güneyisi et al., 2014)**

Amassadura	a/c	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )							
			Água	Cimento	Cinzas volantes	Areia de rio	AFN	AGR		Superplastificante
								8-16 mm	4-8 mm	
RCA	0,38	100	209	440	110	523,4	224,6	493,5	211,5	9,35

RCA-HCL								495,9	212,8	
RCA-WG								476,4	204,5	7,7
ECA-TSM								493,5	211,5	9,35
RCA-CSF								444,7	190,8	

Uygunoğlu et al. (2014) estudaram BAC com introdução de AGN, AGR e agregados provenientes de resíduos de mármore (AGM). Os agregados de mármore tiveram origem numa fábrica de processamento e corte de mármore em Afyonkarahisar (Turquia) e os AGR em betão produzido no laboratório da Afyon Kocatepe University.

Para cada tipo de agregado (AGN, AGR e AGM), foi produzido BAC com as seguintes relações a/c: 0,31, 0,34, 0,37 e 0,40. Em todas as amassaduras, foram mantidas constantes a quantidade de cimento (CEM I 42.5R) e cinzas (classe F). Para cada relação a/c, as quantidades de água, areia natural e superplastificante foram mantidas constantes. Em todas as amassaduras, foi usado 60% de agregados grossos (AGN, AGR ou AGM) e 40% de agregado fino (areia natural).

As características dos agregados são apresentadas na Tabela 26 e na Tabela 27. Na Tabela 28, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 26 - Propriedades dos agregados (Uygunoğlu et al., 2014)**

Material	Densidade relativa	Resistência ao desgaste (%)
AGN	2,72	23,2
AGR	2,44	39,3
AGM	2,77	34,9

**Tabela 27 - Distribuição granulométrica dos agregados (Uygunoğlu et al., 2014)**

Dimensão do peneiro (mm)	22	16	8	4	2	1	0,5	0,25
% passado acumulado								
AGN	100	80,9	47,8	33,9	24,2	13,7	6,7	3,2
AGR	100	92,3	55,8	33,5	24,2	13,7	6,7	3,2
AGM	100	92,3	55,8	33,5	24,2	13,7	6,7	3,2

**Tabela 28 - Composição das amassaduras (Uygunoğlu et al., 2014)**

Amassadura	a/c	% de AGR	% de AGM	Dosagens (kg/m³)								
				Água	Cimento	Cinzas volantes	Areia natural (0-4 mm)	AGN	AGR	AGM	Superplastificante	
AGN-1	0,31	0	0	140	350	100	720	986	-	-	-	10,8
AGN-2	0,34			153			706	966				9,5
AGN-3	0,37			167			692	947				8,1
AGN-4	0,40			180			678	927				6,8
AGM-1	0,31	0	100	140			720	-	-	-	1002	10,8
AGM-2	0,34			153			706				982	9,5
AGM-3	0,37			167			692				963	8,1
AGM-4	0,40			180			678				943	6,8
AGR-1	0,31	100	0	140			720	-	-	-	1109	10,8
AGR-2	0,34			153			706				1087	9,5
AGR-3	0,37			167			692				1065	8,1
AGR-4	0,40			180			678				1043	6,8

Kebaïli et al. (2015) estudaram BAC com incorporação de AGR. O estudo consistiu na produção de quatro tipos de BAC com diferentes percentagens de substituição de AGN por AGR: 0, 40, 60 e 100%. Em todas as amassaduras, as quantidades dos constituintes do BAC foram mantidas constantes, excepto a quantidade de AGN e AGR. A relação a/c foi mantida constante: 0,49. O cimento usado foi o CEM 52.5R e a areia de rio possuía módulo de finura de 3.05. Os AGR tiveram origem da demolição de edifícios antigos cujas propriedades desse betão eram desconhecidas. As peças de betão foram trituradas em laboratório através do triturador de maxilas.

As características dos agregados são apresentadas na Tabela 29. Na Tabela 30, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 29 - Propriedades dos agregados (Kebaïli et al., 2015)**

Material		Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência ao desgaste (%)	Absorção de água às 24 h (%)
Areia de rio	0-4 mm	2670	-	1,5
AGN	4-10mm	2670	15	1
AGR	4-10mm	2500	35	5,1

**Tabela 30 - Composição das amassaduras (Kebaïli et al., 2015)**

Amassadura	a/c *	% de AGR	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )							
			Água total**	Água efectiva***	Cimento	Fíler calcário	Areia de rio	AGN	AGR	Superplastificante
SCC0	0,37	0	190,0	171,7	354	111	850	850	-	3,72
SCC40		40	203,9					510	340	
SCC60		60	210,9					340	510	
SCC100		100	224,8					-	850	
* (água efectiva) / (cimento + fíler calcário) ** Tendo em conta a absorção de água às 24 h pelos AG *** Água necessária para a hidratação do cimento										

Herbudiman e Saptaji (2013) estudaram BAC com introdução de pó proveniente de telhas como substituto de cimento (tp). As telhas são resíduos tradicionais abundantes na Indonésia. Estes resíduos possuem sílica, sendo por isso usado como material pozo-lânico, possuem propriedades de ligante e funcionam como agente de enchimento. As percentagens de substituição de telha em pó usadas para a produção de BAC foram de 0, 10, 20 e 30% do peso de cimento. A relação a/c usada nas amassaduras foi de 0,35, 0,32 e 0,29. A dimensão máxima dos agregados grossos naturais foi de 15 e 20 mm. A quantidade de agregado grosso usado foi de 50% do volume de sólidos e a quantidade de agregado fino usado foi de 40% do total do volume de argamassa. Os agregados grossos foram lavados antes de serem usados (excepto na amassadura VII). Foi usado 5% de sílica de fumo e superplastificante em dosagens de 0,5, 1,0, 1,2 e 1,5%. As características dos AFN e dos AGN são apresentadas na Tabela 31.

As amassaduras foram agrupadas em quatro famílias com o objectivo de se estudar diferentes variações:

- ♦ 1ª família (amassaduras: I, II e III) - nesta família, foram mantidos os seguintes parâmetros constantes: relação a/c (0,35); quantidade de cimento (75%); sílica

de fumo (5%); telha em pó (20%); agregado grosso (50%); o único parâmetro variável foi a dosagem de superplastificante (0,5, 1,0 e 1,5%);

- ♦ 2ª família (amassaduras: IV, V, II e VI) - nesta família, foram mantidos os seguintes parâmetros constantes: relação a/c (0,35); quantidade de sílica de fumo (5%); agregado grosso (50%); superplastificante (1.0%); e de água; os únicos parâmetros variáveis foi a quantidade de telha em pó (0, 10, 20 e 30%) e a quantidade de cimento;
- ♦ 3ª família (amassaduras: VIII, X, XI e XII) - nesta família, foram mantidos os seguintes parâmetros constantes: quantidade de cimento (75%); sílica de fumo (5%); telha em pó (20%); agregados grossos (45%); e de água; o único parâmetro variável foi a relação a/c (0,35, 0,32, 0,32 e 0,29);
- ♦ 4ª família (amassaduras: VII e VIII) - nesta família, foram mantidos os seguintes parâmetros constantes: relação a/c (0,35); quantidade de cimento (75%); telha em pó (20%), sílica de fumo (5%); agregado grosso (45%); superplastificante (1.2%); e de água; o único parâmetro variável foi o tratamento aos agregados grossos: não lavado (amassadura VII); e lavado, dividido a metade da sua dimensão (amassadura VIII);
- ♦ 5ª família (amassaduras: VIII e IX) - semelhante à 3ª família, excepto no parâmetro variável: agregados grossos divididos a metade da sua dimensão (amassadura VIII) e agregados grossos reduzidos à fracção 10-15 mm.

Na Tabela 32, são apresentadas as composições das amassaduras realizadas.

**Tabela 31 - Propriedades dos agregados (Herbudiman e Saptaji, 2013)**

Material	Densidade relativa	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
AFN	2,53	1630	2,04
AGN	2,60	1420	1,66

**Tabela 32 - Composição das amassaduras (Herbudiman e Saptaji, 2013)**

Amassadura	a/c	% de telha em pó	Dosagens (kg/m <sup>3</sup> )						
			Água	Cimento	Sílica de fumo	AFN	AGN	Telha em pó	Superplastificante
I	0,35	20	180	385,714	25,714	891,566	710	102,857	2,571
II						885,055			5,143
III						878,544			7,714
IV						488,571			0
V						437,143			51,429
VI						334,286			154,286
VII	0,35	20	180	385,714	25,714	951,593 (não lavado)	639 (não lavado)	102,857	6,171
VIII						951,593	639 (dividido a 1/2)		
IX							639 (reduzido à fracção 10-15 mm)		
X	0,32	22	180	421,875	28,125	909,245	639	112,5	6,75
XI						904,972			8,438
XII						0,29			24

Na Tabela 33, é apresentado um resumo qualitativo dos constituintes do BAC usado pelos diferentes autores em análise.

**Tabela 33 – Resumo qualitativo dos diferentes materiais usados na produção do BAC**

Autores	a/c	Cimento	Cinzas volantes	Sílica de fumo	Fíler calcário	Superplastificante	Agente modificador da viscosidade	Areia de rio	AN		AR	
									AGN	AFN	AGR	AFR
(Corinaldesi et al., 2002)	0,40; 0,45	√	√	√	√	√	×	√	×	×	√	√
(Corinaldesi et al., 2004)	0,45	√	√	×	×	√	×	√	√	×	√	√
(Kou e Poon, 2009)	0,53; 0,44; 0,35	√	√	×	×	√	√	√	×	×	√	√*
(Grdic et al., 2010)	0,41; 0,43; 0,45	√	×	×	√	√	×	√	√	×	√*	×
(Safiuddin et al., 2011)	0,60	√	×	×	×	√	×	√	√	×	√*	×
(Panda e Bal, 2013)	0,47	√	×	×	×	√	√	√	√	×	√*	×
(Tuyan et al., 2014)	0,43; 0,48; 0,53	√	√	×	√	√	×	×	√	√	√*	×
(Pereira-de-Oliveira et al., 2014)	0,57; 0,56	√	×	×	√	√	×	√	√	×	√*	×
(Modani e Mohitkar, 2014)	0,53	√	×	√	×	√	×	√	√	×	√	×
(Güneyisi et al., 2014)	0,38	√	√	×	×	√	×	√	×	√	√	×
(Uygunoğlu et al., 2014)	0,31; 0,34; 0,37; 0,40	√	√	×	×	√	×	√	√	×	√	×
(Kebaïli et al., 2015)	0,37	√	×	√	√	√	×	√	√	×	√	×
(Herbudiman e Saptaji, 2013)	0,35; 0,32; 0,29	√	×	√	×	√	×	×	√	√	×	√*

\* Diferentes percentagens de substituição

Verifica-se que a maioria dos estudos incide sobre a substituição de AGN por AGR. Para a produção de BAC, a relação a/c foi em média de 0,43. Em todos os estudos, foi usado superplastificante. Este material é fundamental para que o betão tenha determinadas características em estado fresco, sendo, por isso, classificado como BAC. As cinzas volantes, a sílica de fumo e o fíler calcário foram usados em alguns estudos também com o objectivo de melhorar as propriedades do BAC em estado fresco.

## 2.2. Propriedades do BAC com AR

Para cada propriedade analisada por cada autor, são apresentados os resultados obtidos (sob a forma de gráfico e/ ou tabela) e de seguida identificadas as tendências e justificadas as mesmas (com base em aspectos físicos e químicos). Por fim, é feita uma comparação da propriedade pelos diferentes autores.

No estado fresco, são analisadas as seguintes propriedades: fluidez, velocidade do



escoamento na ausência de obstruções, viscosidade, capacidade de enchimento, capacidade de escoamento através de espaços confinados, resistência à segregação e capacidade de passagem através de espaços estreitos.

No estado endurecido, são analisadas as seguintes propriedades: massa volúmica, velocidade de propagação de ultra-sons, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, resistência à tracção por flexão, módulo de elasticidade, permeabilidade ao oxigénio, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à penetração de cloretos e retracção.

Nas investigações consultadas, verifica-se diferentes tendências (para a mesma propriedade) dependente dos tipos de AR usados (AGR e/ou AFR). Tal é mais evidente nas propriedades do BAC em estado fresco. Na maioria das investigações, os autores optaram pela utilização de apenas AGR (como substituto dos AGN) para a produção de BAC.

De seguida, são analisadas as propriedades do BAC obtidas nas diversas campanhas experimentais.

### **2.2.1. Propriedades do BAC com AR no estado fresco**

Verifica-se, nas investigações consultadas, que o ensaio de espalhamento (que avalia a fluidez e velocidade do escoamento do BAC na ausência de obstruções), o ensaio de funil V (que avalia a viscosidade e capacidade de enchimento do BAC) e o ensaio de escoamento na caixa L (que avalia a capacidade de escoamento do BAC através de espaços confinados) são os mais realizados em BAC no estado fresco. O ensaio de segregação de peneiro (que avalia a resistência à segregação do BAC) e o ensaio de espalhamento no anel J (que avalia a capacidade de passagem do BAC através de espaços estreitos) não se encontram na maioria dos estudos pesquisados, provavelmente por serem ensaios mais recentes e, por isso, ainda pouco validados.

A fluidez e velocidade do escoamento do BAC na ausência de obstruções foram avaliadas por Corinaldesi et al. (2002), Corinaldesi et al. (2004), Kou e Poon (2009), Grdic et al. (2010), Safiuddin et al. (2011), Tuyan et al. (2014), Pereira-de-Oliveira et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014), Güneyisi et al. (2014), Uygunoğlu et al. (2014), Kebaïli et al. (2015), Herbudiman e Saptaji (2013).

A viscosidade e a capacidade de enchimento foram avaliadas por Corinaldesi et al. (2004), Safiuddin et al. (2011), Tuyan et al. (2014), Pereira-de-Oliveira et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014), Güneyisi et al. (2014).

A capacidade de enchimento através de espaços confinados foi avaliada por Corinaldesi et al. (2002), Corinaldesi et al. (2004), Kou e Poon (2009), Grdic et al. (2010), Tuyan et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014), Güneyisi et al. (2014), Kebaïli et al. (2015).

A resistência à segregação foi avaliada por Kou e Poon (2009), Grdic et al. (2010) e Safiuddin et al. (2011).

Por fim, a capacidade de passagem através de espaços estreitos foi avaliada apenas por Safiuddin et al. (2011) e por Uygunoğlu et al. (2014).

### 2.2.1.1. Fluidez e velocidade do escoamento na ausência de obstruções

O ensaio de espalhamento para o BAC (de acordo com a norma NP EN 12350-8, 2010) permite avaliar a fluidez e a velocidade de escoamento na ausência de obstruções. Os parâmetros que permitem avaliar as referidas propriedades é o tempo que o BAC demora a formar um círculo de 500 mm, designado por tempo de espalhamento ( $T_{500}$ ) e o espalhamento (SF).

Relativamente ao diâmetro de espalhamento, verifica-se que este diminui com a introdução de AGR. Em relação ao tempo de espalhamento, verifica-se que este aumenta com a introdução de AGR. Estes dois factos são justificados pela maior absorção de água dos AR em relação aos AN. Na análise destas propriedades, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas, influência do superplastificante, influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Corinaldesi et al. (2002) estudaram BAC com introdução de 100% de AR, variando a relação a/c e a introdução de CV, FC e SF. Verifica-se que o BAC em que foi usado SF apresenta menor espalhamento (Figura 1). Em relação ao tempo de espalhamento (Figura 2), os investigadores obtiveram o mesmo resultado nas quatro amassaduras (3 segundos); no entanto, o tempo decorrido desde o levantamento do cone até o BAC estabelecer a configuração final é maior no BAC com FC.

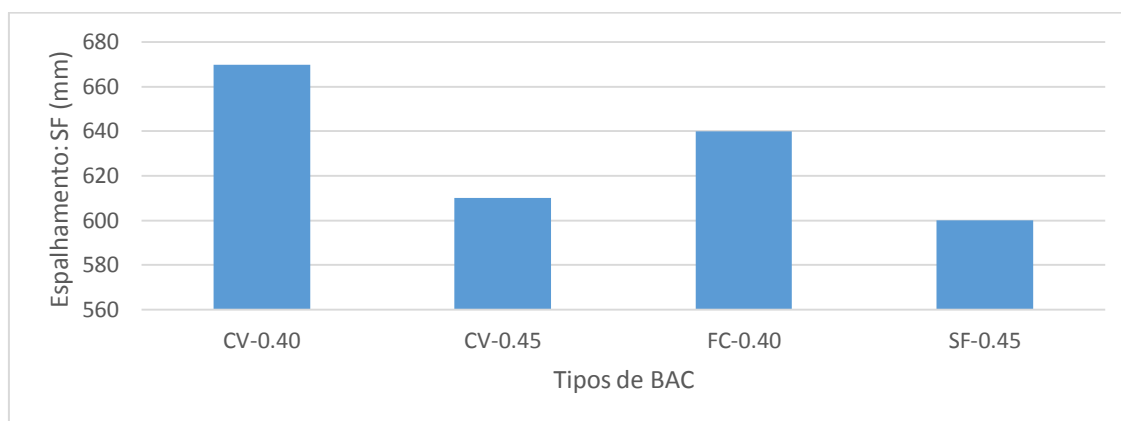


Figura 1 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Corinaldesi et al., 2002)

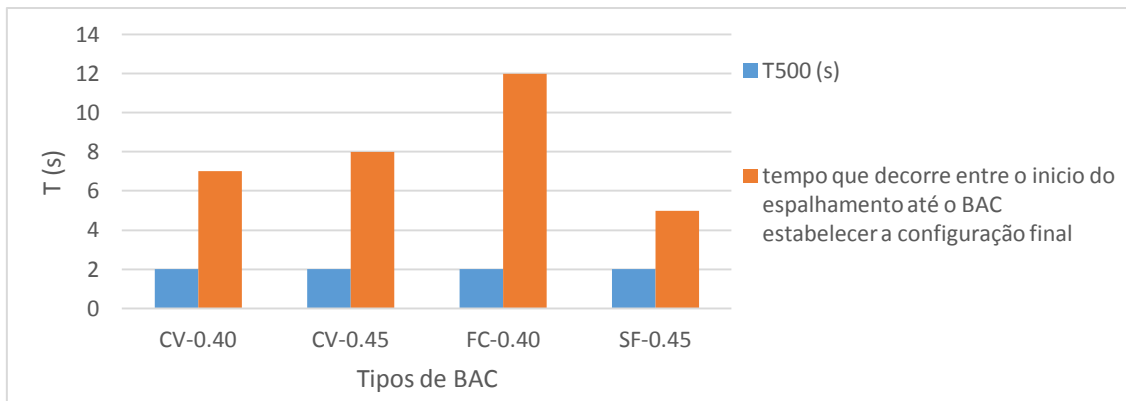


Figura 2 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Corinaldesi et al., 2002)

Corinaldesi et al. (2004), ao estudarem BAC com introdução de AFR (como substituto dos AN) e cinzas (usado como fíler), verificaram que o tempo de espalhamento é semelhante nas duas amassaduras: amassadura apenas com AFR (SCC-RP) e na amassadura apenas com cinzas (SCC-MSWA), como se pode verificar na Figura 3. Assim, os autores concluíram que os AFR e as cinzas contribuem de forma idêntica para a fluidez do BAC. Na amassadura de referência (SCC-REF), não foi possível obter um diâmetro de espalhamento admissível para o BAC, isto é, superior a 550 mm de acordo com a norma NP EN 12350-8 (2010). Este facto é justificado pela ausência de material fino no BAC, o que lhe confere uma maior fluidez.

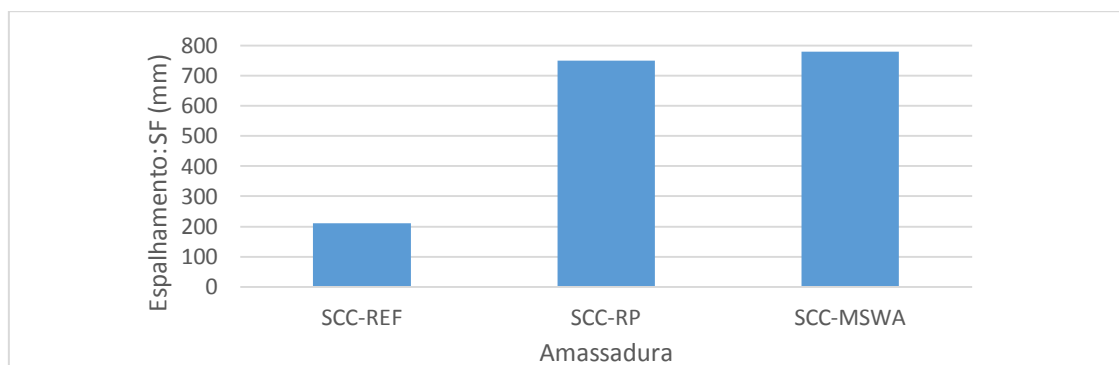
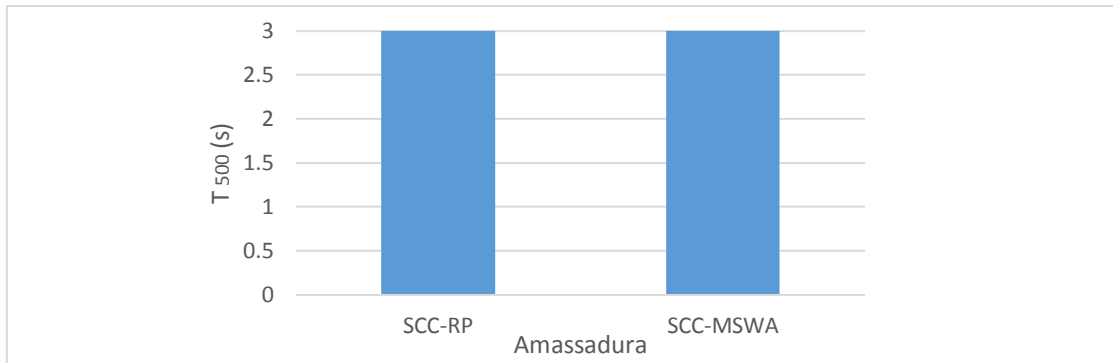


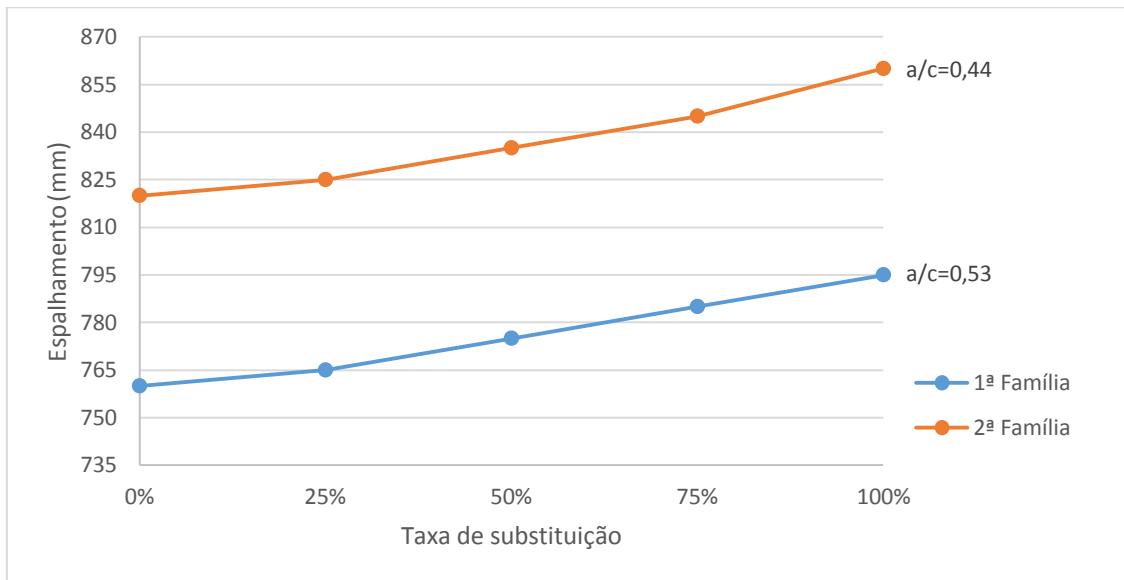
Figura 3 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Corinaldesi et al., 2004)

Em relação ao tempo de espalhamento, Corinaldesi et al. (2004) obtiveram resultados idênticos para as amassaduras com AFR (SCC-RP) e com cinzas (SCC-MSWA) (Figura 4).

Kou e Poon (2009) verificaram que o espalhamento aumentava com a percentagem de substituição de AFR. Tal é atribuído à elevada capacidade de absorção de água por parte dos AFR em comparação com a areia de rio. À medida que aumentou a quantidade de AFR, foi adicionada mais água e, por conseguinte, o espalhamento aumentou (Figura 5). A partir da Tabela 5, verifica-se que os AFR ao fim de 10 minutos apenas absorveram 55% da sua água de absorção em relação às 24 h. Assim, a água adicional poderá não ter sido totalmente absorvida pelos AFR nos primeiros minutos da amassadura e, por conseguinte, o excesso de água contribui para um aumento do espalhamento.

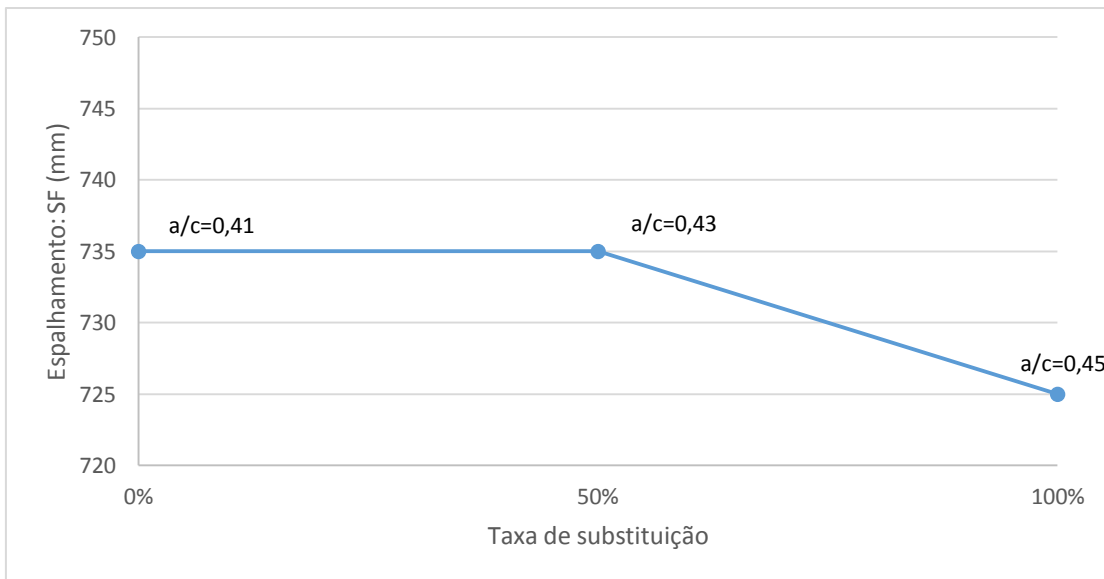


**Figura 4 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Corinaldesi et al., 2004)**



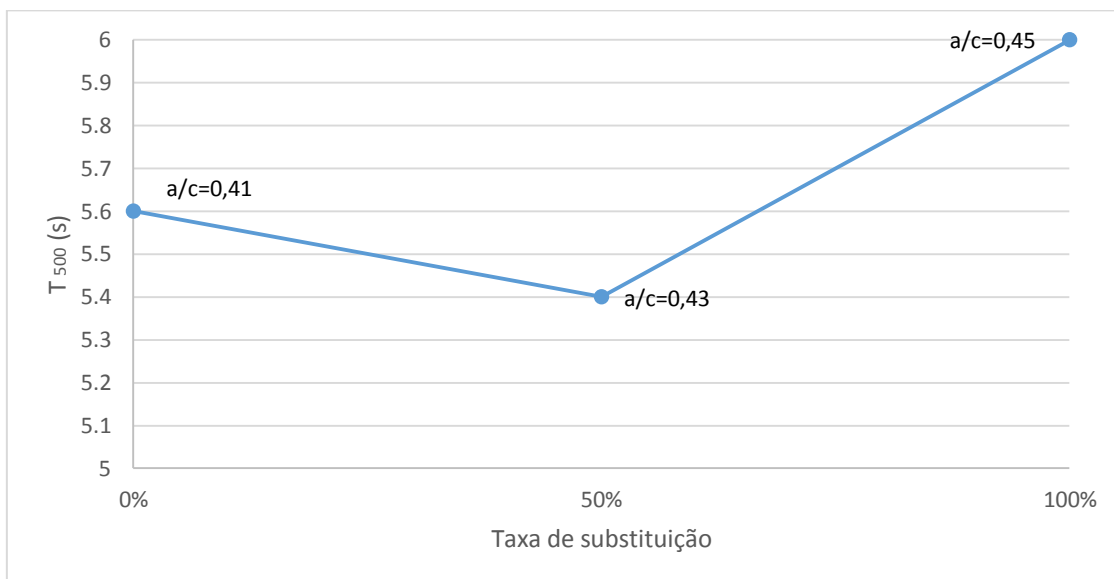
**Figura 5 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Kou e Poon, 2009)**

Por outro lado, Grdic et al. (2010) verificaram que o espalhamento diminuía com a percentagem de substituição de AGR (Figura 6), dado que, para maiores percentagens de substituição, era absorvida mais água pelos agregados.



**Figura 6 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Grdic et al., 2010)**

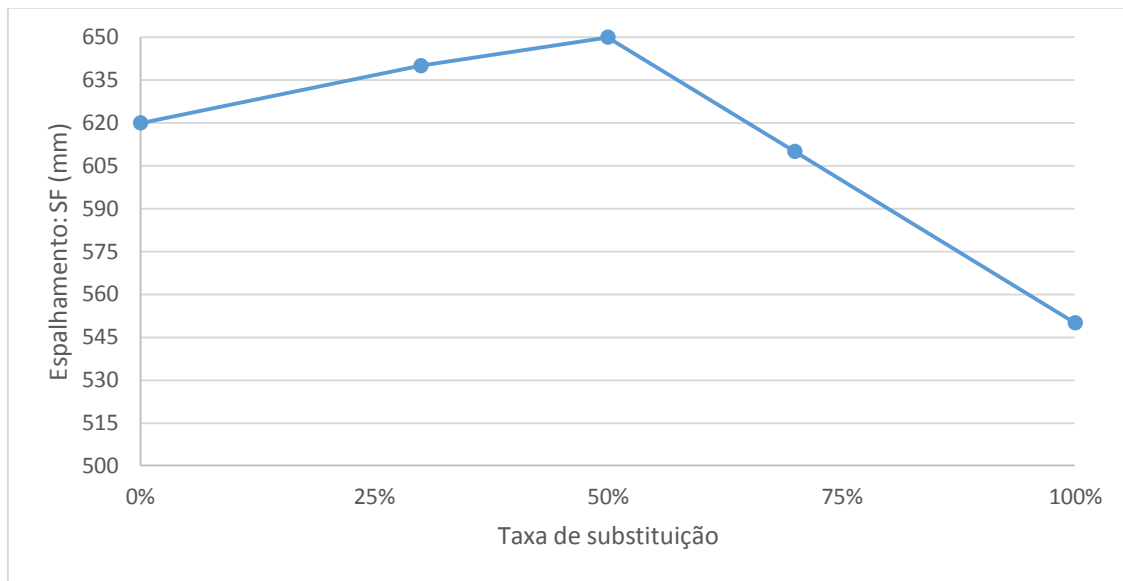
Em relação ao tempo de espalhamento, Grdic et al. (2010) verificaram que este aumenta com a percentagem de substituição de AGR (à exceção do resultado aparentemente anômalo para 50% de incorporação). Tal é devido aos AGR serem mais angulosos e terem uma superfície mais rugosa do que os AGN. Os resultados do tempo de espalhamento obtidos pelos autores são apresentados na Figura 7.



**Figura 7 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Grdic et al., 2010)**

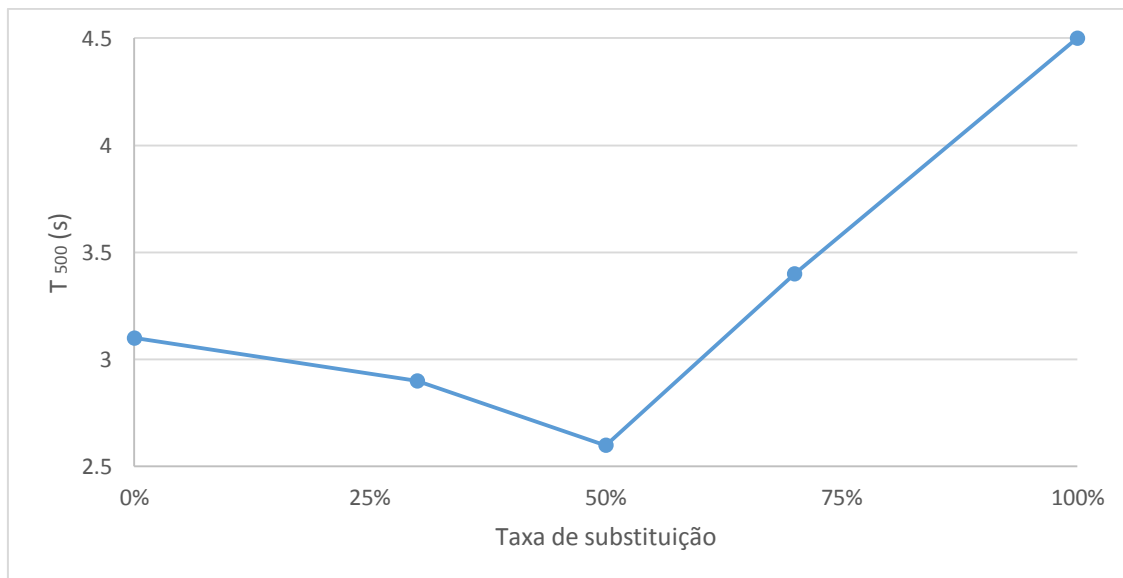
Safiuddin et al. (2011) verificaram que o diâmetro de espalhamento (Figura 8) aumenta com a percentagem de substituição de AGR (30% e 40%), devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas (70% e 100%), o diâmetro de espalhamento diminui devido à maior quantidade de AGR. Para maiores percentagens de substituição, ocorreu um aumento de finos gerados pela quebra de AGR durante o

processo de amassadura; por conseguinte, mais água foi absorvida pelos AR. Este facto fez com que o espalhamento diminuísse.



**Figura 8 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Safiuddin et al., 2011)**

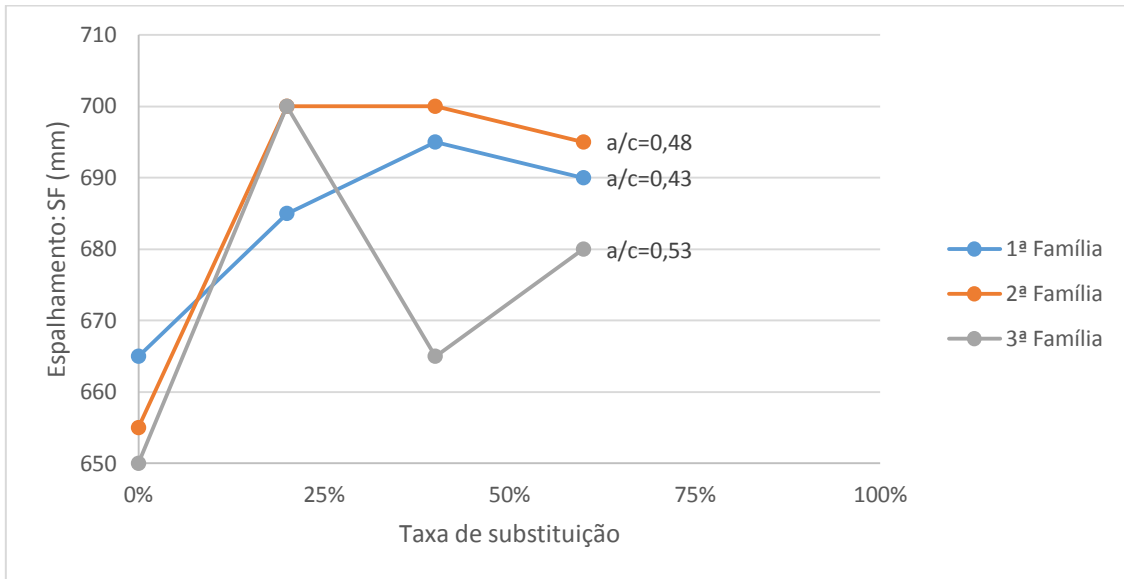
Em relação ao tempo de espalhamento (Figura 9), Safiuddin et al. (2011) verificaram que este diminuía com a percentagem de substituição de AGR de 30 e 40% e aumentava com a percentagem de substituição de AGR de 70 e 100%. A justificação para essas duas tendências foi referida relativamente ao diâmetro de espalhamento. A maior rugosidade e angulosidade dos AGR faz aumentar o atrito entre agregados, contribuindo também para o aumento do tempo de espalhamento.



**Figura 9 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Safiuddin et al., 2011)**

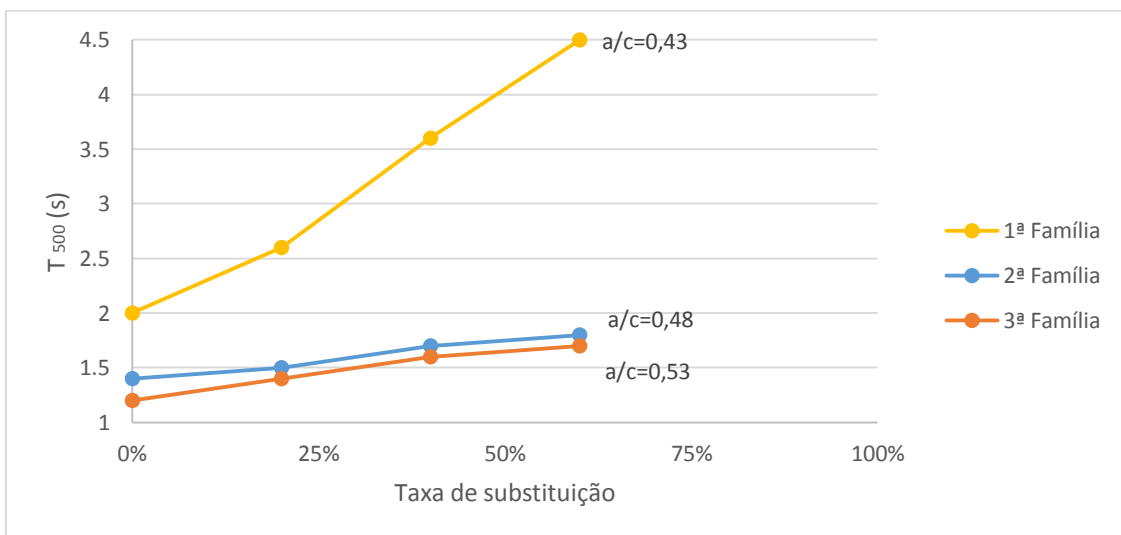
Tuyan et al. (2014) verificaram que o diâmetro de espalhamento (Figura 10) aumenta com a percentagem de substituição de AGR (20%). Para percentagens de substituição

mais elevadas (40 e 60%), o diâmetro de espalhamento diminui. Estas duas tendências também se verificam na campanha de Safiuddin et al. (2011), sendo que, na campanha de Tuyan et al. (2014), a justificação para esse facto é a mesma.



**Figura 10 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Tuyan et al. 2014)**

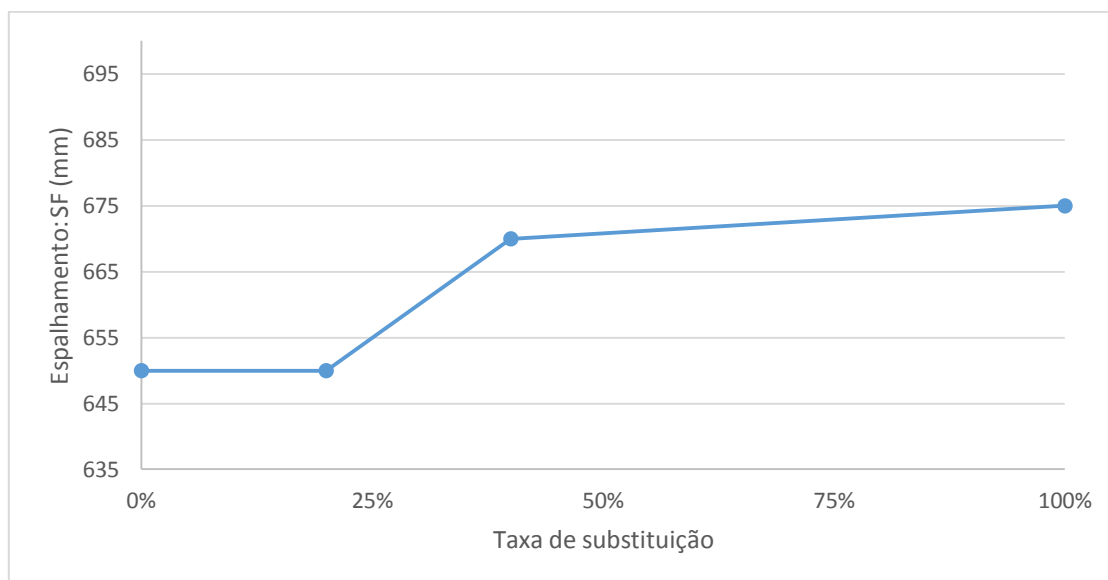
Em relação ao tempo de espalhamento, Tuyan et al. (2014) verificaram que este aumenta com a percentagem de substituição de AGR (Figura 11), devido à sua superfície mais rugosa em comparação com a dos AN e devido ao facto de se ter adicionado menores quantidades de superplastificante (como verificado na Tabela 17). Analisando a Figura 11, verifica-se que os valores de tempo de espalhamento aumentam com a diminuição da relação a/c, como esperado.



**Figura 11 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Tuyan et al. 2014)**

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) verificaram que o diâmetro de espalhamento aumentou com a percentagem de substituição de AGR (Figura 12). Tal é justificado com o gradual aumento de superplastificante que foi necessário adicionar (

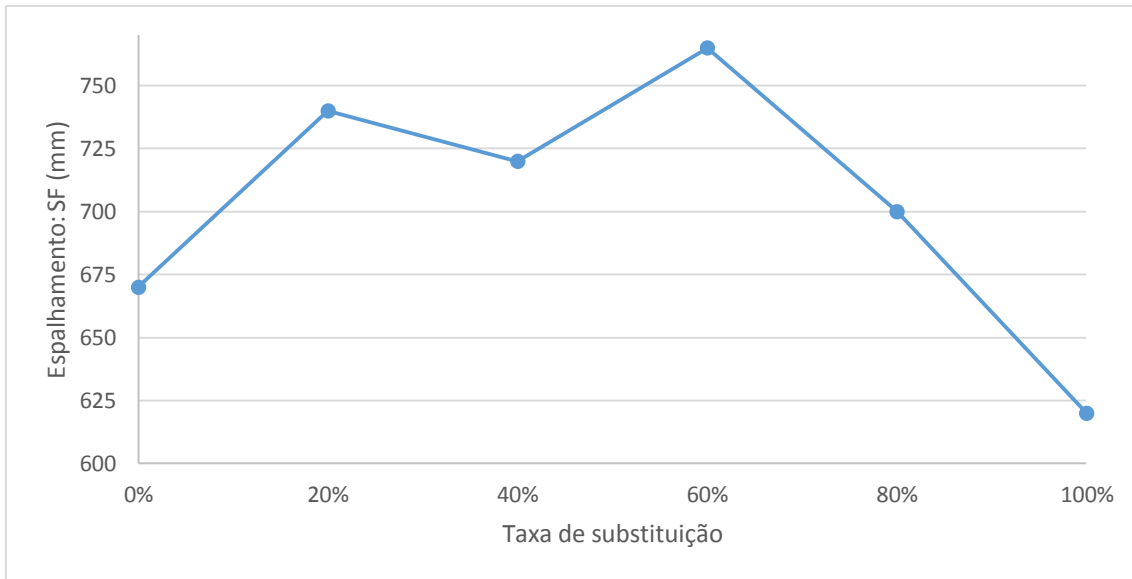
Tabela 19). Com o aumento da percentagem de substituição, foi absorvida mais água pelos AGR, pelo que, para manter a gama de espalhamento estabelecida pelos autores, foi necessário adicionar superplastificante. Como se pode observar na Tabela 18, os AGR absorvem mais água do que os AN.



**Figura 12 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)**

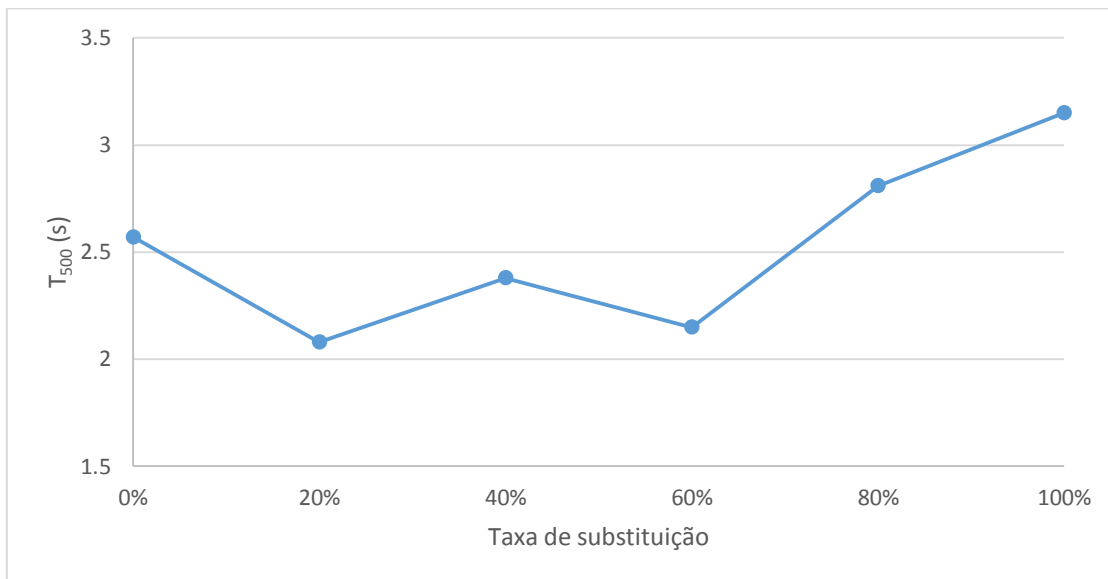
Modani e Mohitkar (2014) obtiveram espalhamentos no intervalo de 620 a 770 mm. Observando a Figura 13, verifica-se que o espalhamento aumenta com a introdução de AGR até 60% de substituição (à excepção do resultado aparentemente anómalo para 40% de incorporação); a partir dessa taxa de substituição, o espalhamento diminui. Esta tendência também se verifica nas campanhas de Tuyan et al. (2014) e de Safiuddin et al. (2011), sendo que na presente campanha a justificação para esse facto é a mesma.





**Figura 13 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Modani e Mohitkar, 2014)**

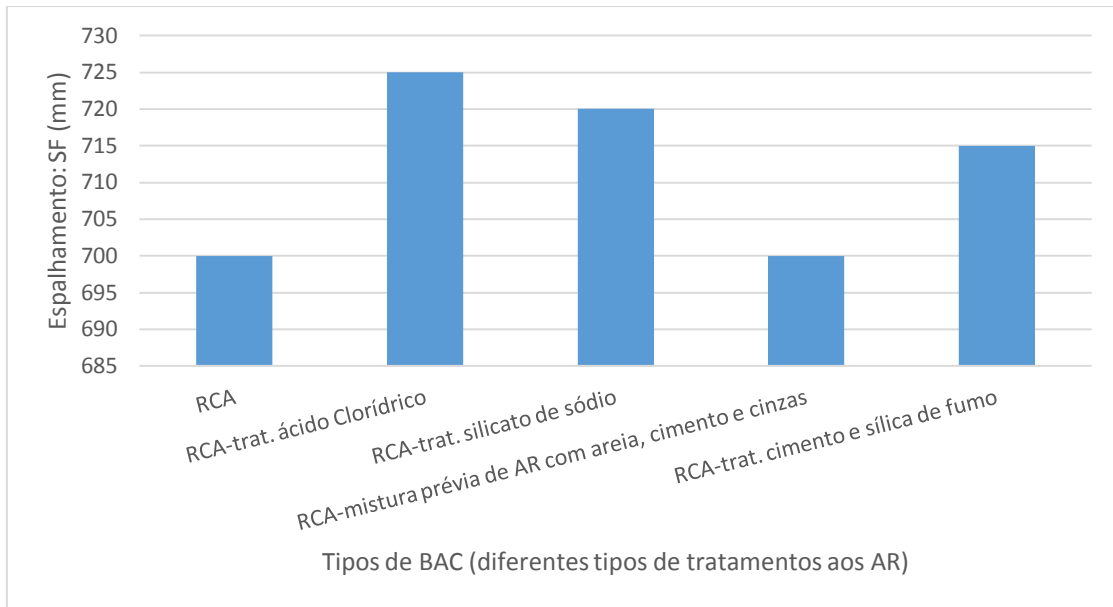
Em relação ao tempo de espalhamento (Figura 14), verifica-se que este diminui até 60% de incorporação de AGR (à exceção do resultado aparentemente anômalo para 20% de incorporação), em relação ao BAC de referência (0% de AGR). A partir de 60% de incorporação de AGR, o BAC aumenta o seu tempo de espalhamento devido à maior absorção dos AGR. Esta tendência também foi verificada na campanha de Safiuddin et al. (2011).



**Figura 14 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Modani e Mohitkar, 2014)**

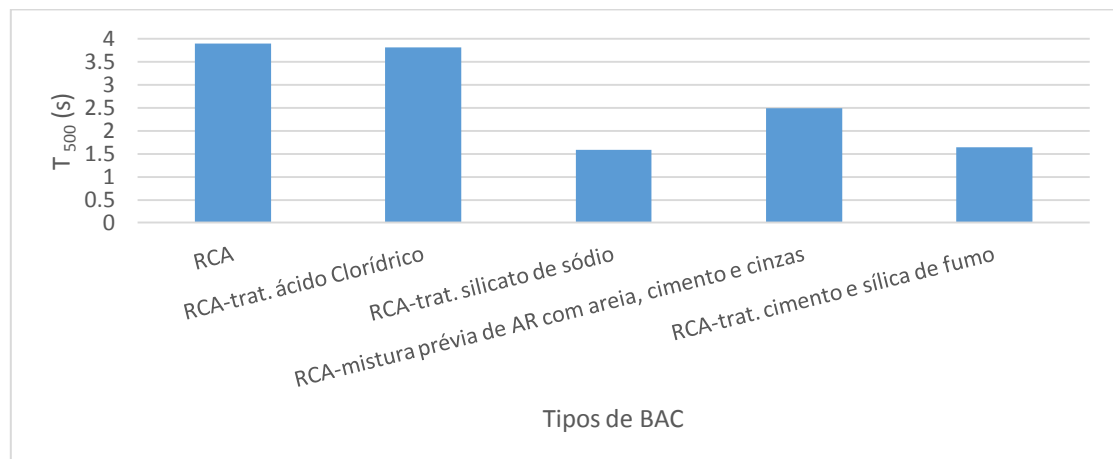
Güneyisi et al. (2014), ao estudar BAC com AR submetidos a diferentes tratamentos da sua superfície, verificaram que o diâmetro de espalhamento foi maior no BAC em que foram introduzidos AR tratados com ácido clorídrico (Figura 15). Tal é justificado pelo facto de os AR possuírem reduzida argamassa antiga aderida aos mesmos, uma vez que esta foi removida aquando do tratamento aos AR. O ácido clorídrico dissolveu a argamassa aderida aos agregados, o que fez com que fosse reduzida a absorção de água por

parte dos AR (como se pode verificar na Tabela 24).



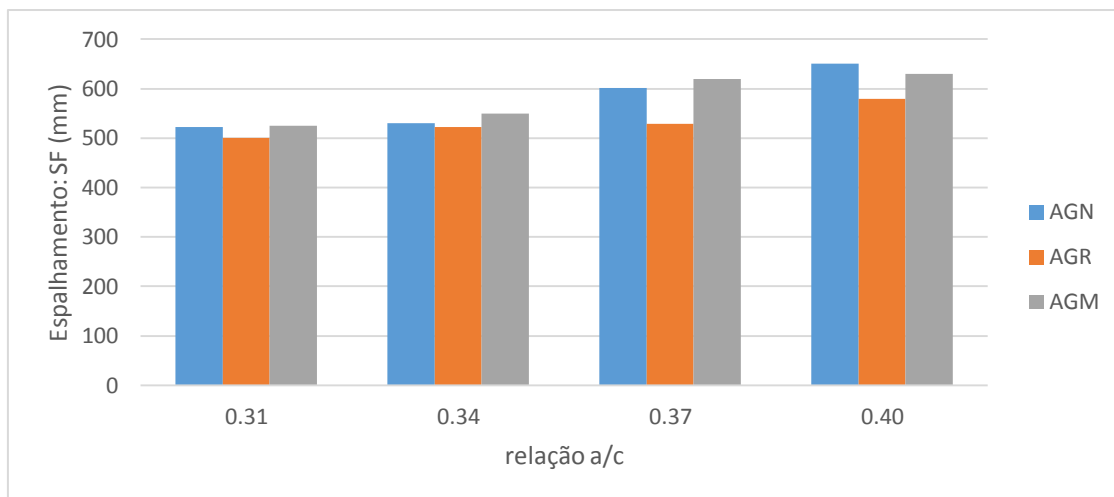
**Figura 15 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Güneyisi et al., 2014)**

Em relação ao tempo de espalhamento, Güneyisi et al. (2014) verificaram que o BAC em que foi introduzido AR com tratamento de silicato de sódio foi o que obteve um menor tempo de espalhamento (Figura 16). Tal é justificado pela reduzida capacidade de absorção de água dos AR (como se pode verificar na Tabela 24) e também pela sua superfície lisa conferida pelo tratamento que foi dado aos agregados.



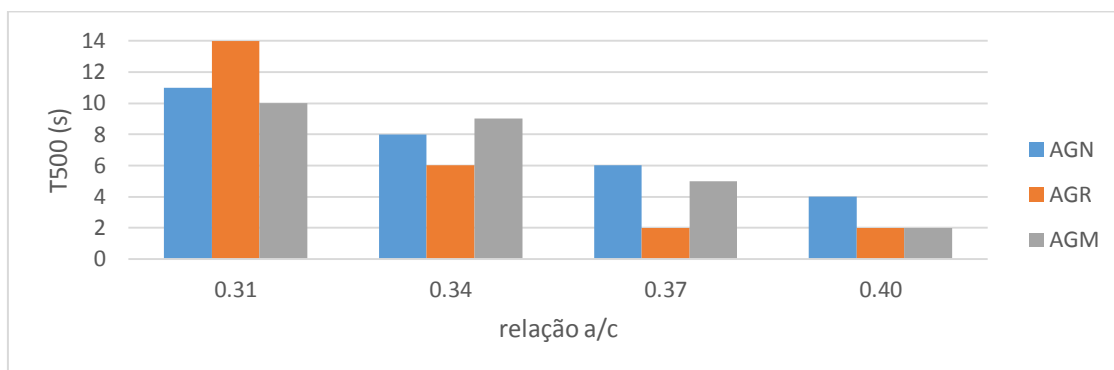
**Figura 16 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Güneyisi et al., 2014)**

Uygunoğlu et al. (2014), para os três tipos de agregados estudados (AGN, AGR e AGM), verificaram que o espalhamento aumenta com a relação a/c, como expectável (Figura 17). Observando a Figura 17, para todas as relações a/c, verifica-se que o BAC com menor espalhamento é o que contém AGR. Tal é justificado pela maior rugosidade da sua superfície em comparação com os AGN e AGM.



**Figura 17 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Uygunoğlu et al., 2014)**

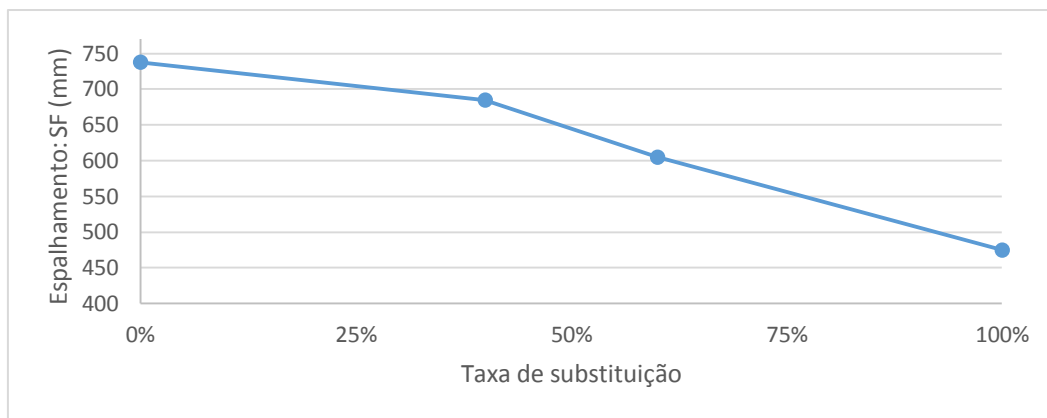
Em relação ao tempo de espalhamento (Figura 18), verifica-se que o BAC que contém AGR apresenta menor tempo de espalhamento (à exceção do BAC com AGR produzido com relação a/c de 0,31). Tal é justificado pela argamassa do BAC que move com maior facilidade os AGR uma vez que estes são mais leves (em comparação com os AGN e AGM).



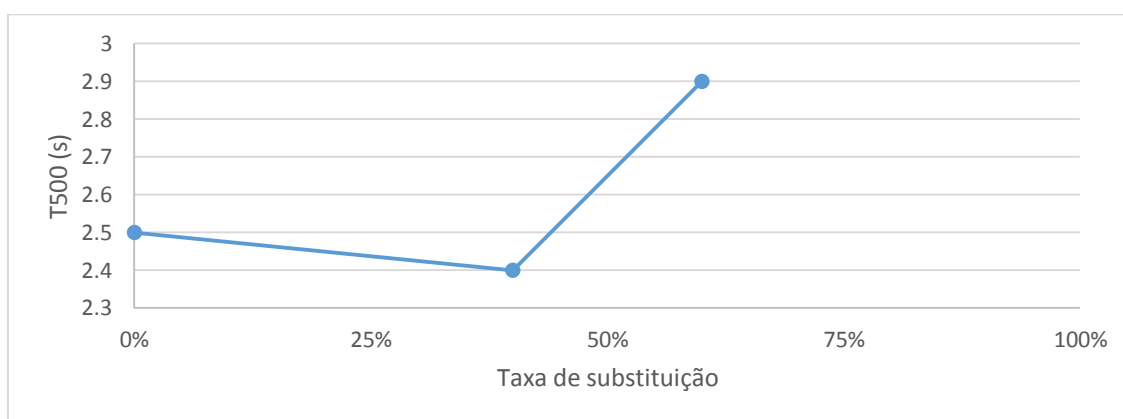
**Figura 18 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Uygunoğlu et al., 2014)**

Kebaïli et al. (2015) verificaram que o diâmetro de espalhamento diminui com o aumento da percentagem de substituição de AGR (Figura 19). Para as percentagens de substituição de 60 e 100%, não é cumprido o requisito exigido na norma NP EN 12350-8 (2010), isto é, o diâmetro de espalhamento tem de ser superior a 650 mm.

No que diz respeito ao tempo de espalhamento (Figura 20), verificou-se que em todos os BAC foi possível obter o tempo de espalhamento excepto no BAC com 100% de AGR. Não foi possível obter o tempo de espalhamento para o BAC com 100% de AGR, uma vez que este não chegou a atingir o diâmetro de 500 mm de espalhamento, como se pode constatar na Figura 19.



**Figura 19 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Kebaili et al., 2015)**



**Figura 20 - Resultados do ensaio de espalhamento: tempo de espalhamento (Kebaili et al., 2015)**

Herbudiman e Saptaji (2013), no seu estudo em que usaram pó de telha, verificaram que uma elevada proporção de agregados grossos naturais introduzidos no BAC (50% do volume de sólidos) não satisfaz o limite mínimo admissível para o espalhamento em BAC (nas amassaduras I a VI apresentadas na Figura 21). O espalhamento tem de ser superior a 550 mm de acordo com a norma NP EN 12350-8 (2010) para que possa ser considerado BAC. Para ultrapassar essa questão, os autores, reduziram a quantidade de agregados grossos naturais até 45% (amassadura VIII a XI) e verificaram que os valores de espalhamento aumentam para valores admissíveis. Observando a Figura 21, verifica-se que o espalhamento aumenta com a relação a/c (como expectável). Também se verifica que o maior diâmetro de espalhamento é verificado na amassadura XI uma vez que foi usada maior quantidade de superplastificante.

Na Figura 22 e na Figura 23, é apresentado o resumo dos resultados do diâmetro de espalhamento obtidos pelos autores em análise (para diferentes taxas de substituição de AR).

Analisando as campanhas de Grdic et al. (2010) e Pereira-de-Oliveira et al. (2014), verifica-se que o diâmetro de espalhamento diminui com a percentagem de substituição de AGR, dado que, para maiores percentagens de substituição, mais água era absorvida pelos agregados. Esta tendência não foi verificada na campanha de Kou e Poon (2009). Estes autores usaram AFR, ao contrário dos restantes. Nas campanhas de Safiuddin et

al. (2011), Tuyan et al. (2014) e Modani e Mohitkar (2014), verifica-se que o diâmetro de espalhamento aumenta com a percentagem de substituição de AGR (até 20 a 60%), devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas (a partir de 50 a 100%), o diâmetro de espalhamento diminui devido à maior quantidade de AGR. Para maiores percentagens de substituição, ocorreu um aumento de finos gerados pela quebra de AGR durante o processo de amassadura; por conseguinte, mais água foi absorvida pelos AR. Tal fez com que o espalhamento diminuísse.

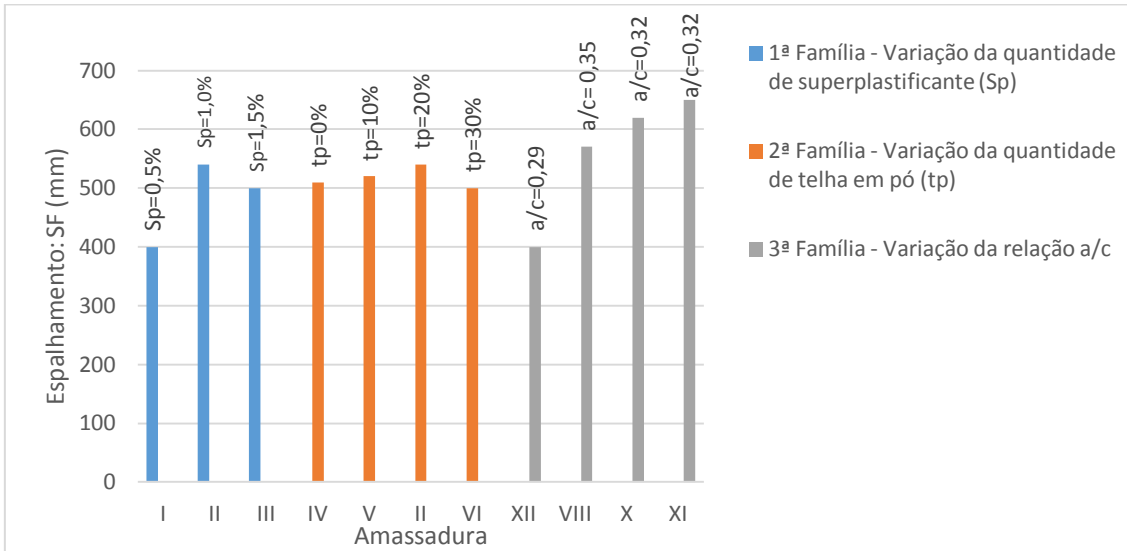


Figura 21 - Resultados do ensaio de espalhamento: diâmetro de espalhamento (Herbudiman e Saptaji, 2013)

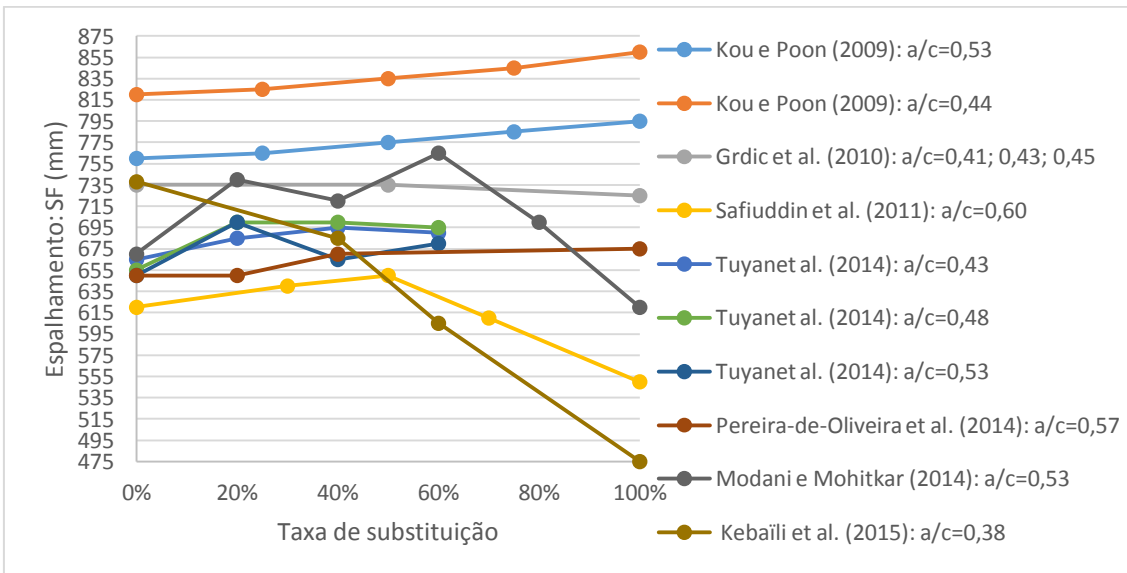


Figura 22 - Comparação dos resultados do ensaio de espalhamento (diâmetro de espalhamento)

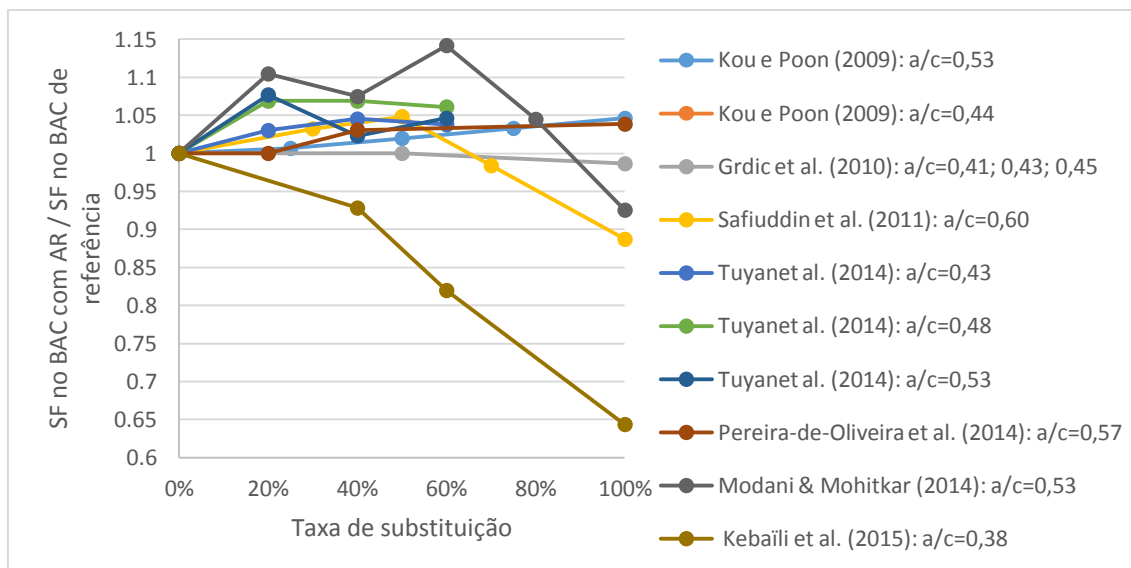


Figura 23 - Comparação dos resultados do ensaio de espalhamento (SF no BAC de referência e os SF nos BAC com AR)

### 2.2.1.2. Viscosidade e capacidade de enchimento

O ensaio de escoamento no funil V (de acordo com a norma NP EN 12350-9, 2010) permite avaliar a viscosidade e a capacidade de enchimento. O parâmetro que permite avaliar as referidas propriedades é o tempo que o betão leva a escoar pelo funil, designado por tempo de escoamento no funil V ( $T_v$ ).

Relativamente ao tempo de escoamento no funil V, verifica-se que este aumenta com a introdução de AR. Tal deve-se à maior absorção de água dos AR em relação aos AN. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas, influência do superplastificante, influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

No estudo de Corinaldesi et al. (2004), verificou-se que o BAC que continha apenas cinzas (SCC-MSWA) tinha maior tempo de escoamento no funil V do que o BAC que continha apenas AFR (SCC-RP). Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 24.

Safiuddin et al. (2011) verificaram que o tempo de escoamento no funil V diminuía com a percentagem de substituição de AGR de 30 e 40% devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas (70 e 100%), o tempo de escoamento no funil V aumentou devido à maior quantidade de AGR e à sua maior rugosidade e angulosidade (Figura 25).

Tuyan et al. (2014) verificaram o tempo de escoamento no funil V aumenta com a percentagem de substituição de AGR (Figura 26). Tal é explicado pela sua superfície mais rugosa em comparação com os AN e pelo facto de se ter adicionado quantidades menores de superplastificante (como verificado na

Tabela 17). Analisando a Figura 26, verifica-se que os valores de tempo de escoamento no funil V aumentam com a diminuição da relação a/c, como esperado.

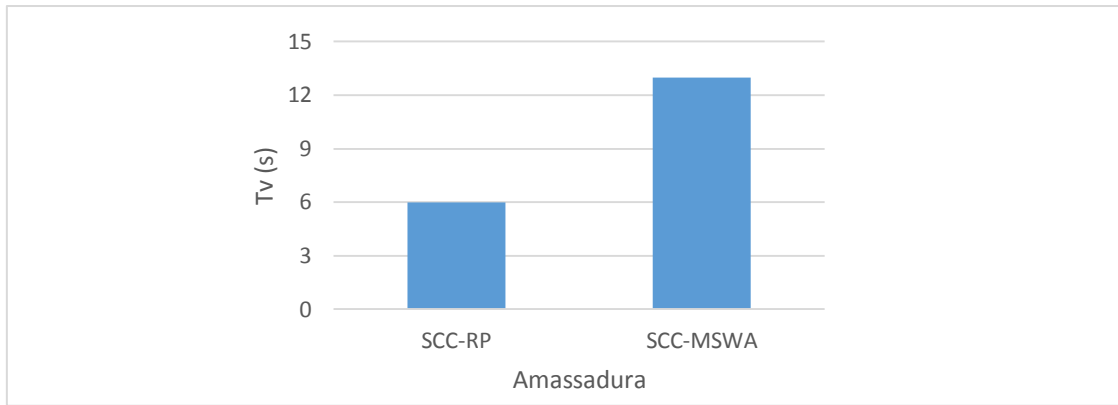


Figura 24 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Corinaldesi et al., 2004)

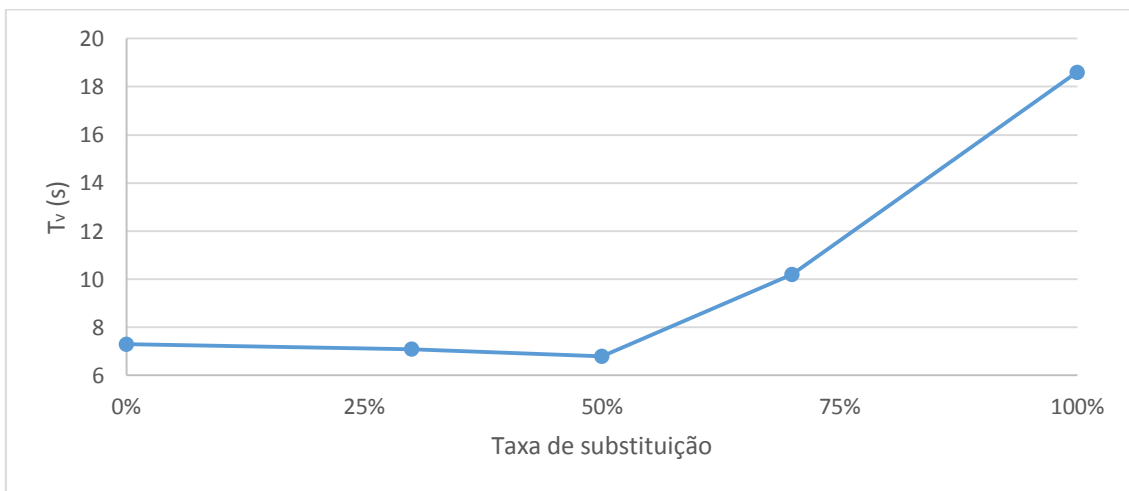


Figura 25 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Safuiddin et al., 2011)

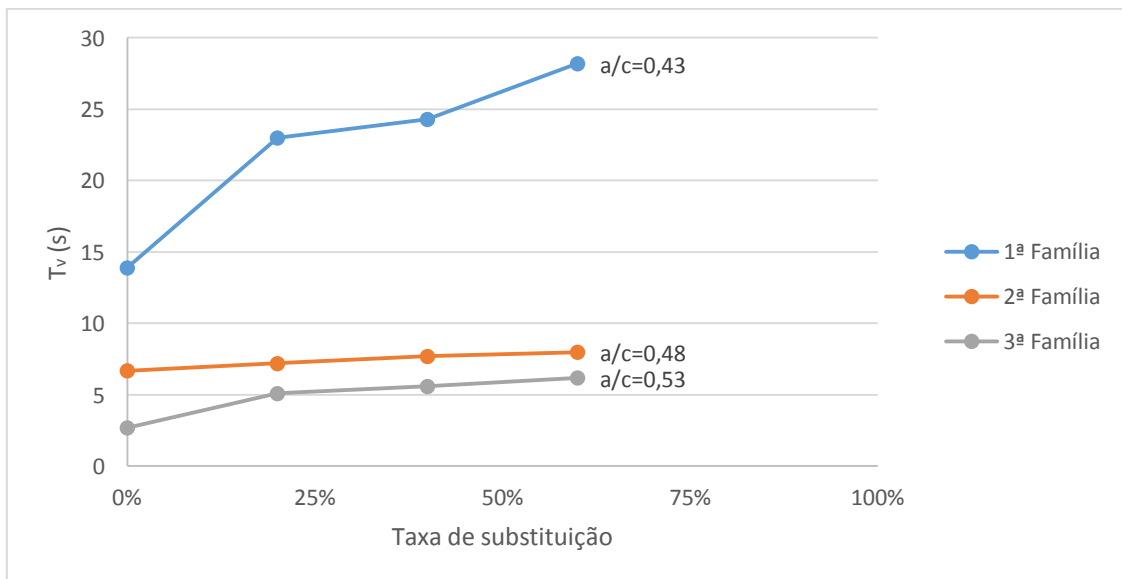
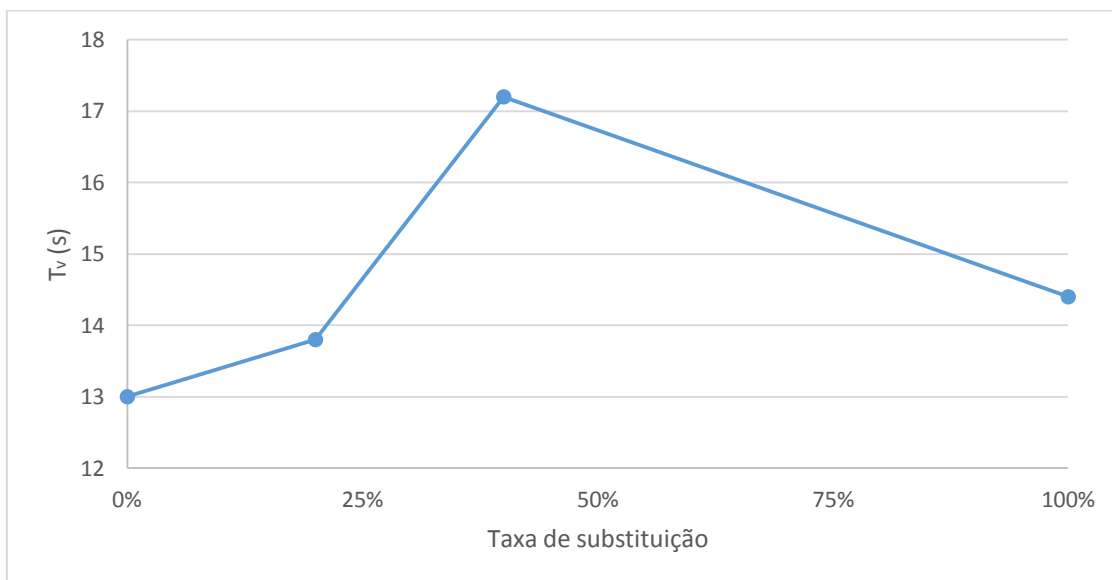
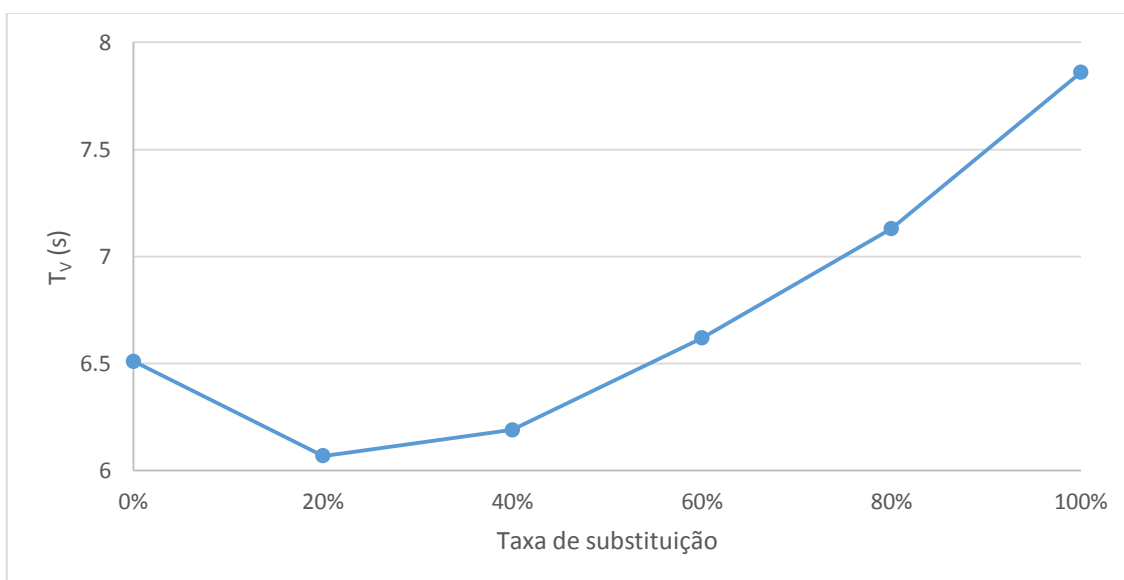


Figura 26 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Tuyan et al. 2014)

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) verificaram que o tempo de escoamento no funil V aumenta com a percentagem de substituição de AGR de 20 e 40%. A amassadura com percentagem de substituição de AGR de 40% tem o maior tempo de escoamento uma vez que é a que possui a menor relação a/c (0,56). As restantes amassaduras possuem a mesma relação a/c (0,57). Por conseguinte, os autores referem que o tempo de funil é fortemente influenciado pela relação a/c. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 27.



**Figura 27 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)**



**Figura 28 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Modani e Mohitkar, 2014)**

Modani e Mohitkar (2014) verificaram que o tempo de escoamento no funil V diminuiu para percentagens de incorporação de AGR (20% de substituição). A partir de 20% de incorporação de AGR, verifica-se que o tempo de escoamento no funil V aumenta (Figura 28). Safiuddin et al. (2011) obtiveram resultados semelhantes, sendo que na



campanha de Modani e Mohitkar (2014) a justificação é idêntica.

Güneyisi et al. (2014) obtiveram um maior tempo de escoamento no funil V no BAC em que foi usado AR tratado com silicato de sódio (Figura 29). Esta tendência também foi verificada para o tempo de espalhamento obtida pelos mesmos autores (Figura 16), sendo que a justificação para as referidas tendências a mesma (§2.2.1.1)

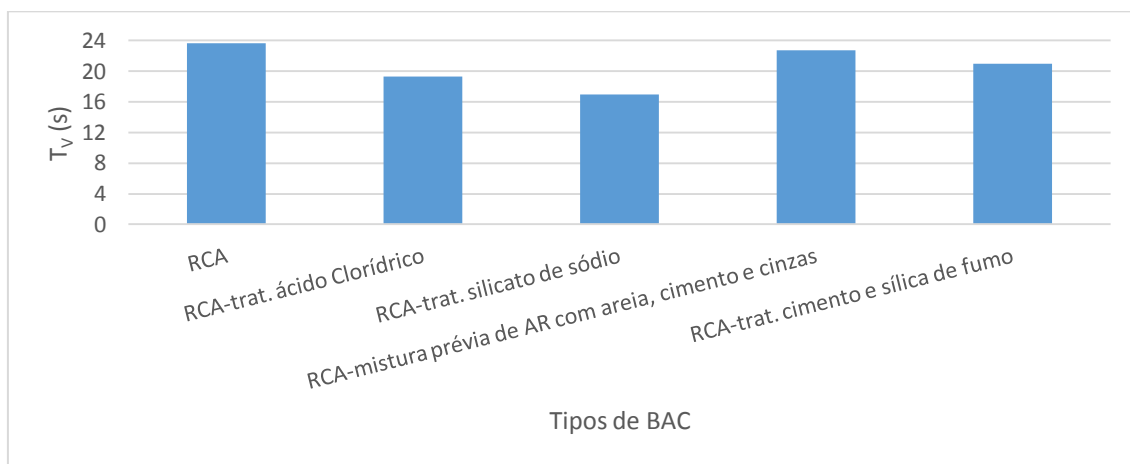


Figura 29 - Resultados do ensaio de escoamento no funil V: tempo de funil (Güneyisi et al., 2014)

Os valores do tempo de escoamento (obtidos pelo ensaio de espalhamento) e os valores de tempo de escoamento no funil V (obtidos pelo ensaio de escoamento no funil V) estão fortemente correlacionados: Safiuddin et al. (2011) obtiveram o coeficiente de relação de 0,9765, com uma relação linear (Figura 30) e Tuyan et al. (2014) obtiveram o coeficiente de relação de 0,9734, com uma relação quadrática (Figura 31). Isto significa que ambos os tempos variaram de forma semelhante com o conteúdo de AGR.

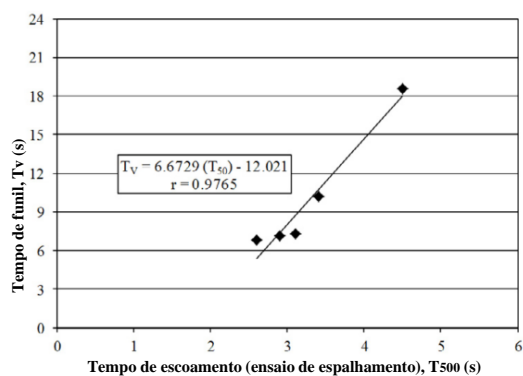


Figura 30 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de escoamento no funil V (Safiuddin et al., 2011)

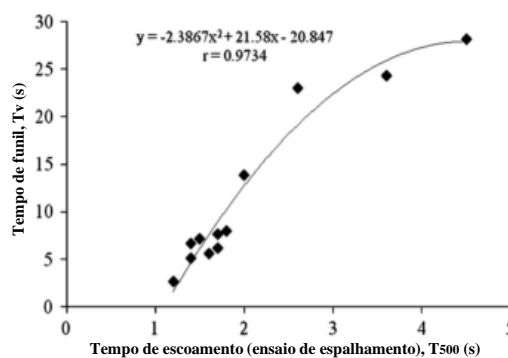


Figura 31 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de escoamento no funil V (Tuyan et al., 2014)

Na Figura 32 e na Figura 33, é apresentado o resumo dos resultados do tempo de funil obtidos pelos autores em análise (para diferentes taxas de substituição de AR).

Na Figura 32, é possível verificar que são atingidos maiores tempos de escoamento no funil V para menores relação a/c (como expectável). Na maioria dos estudos, verifica-se que o tempo de escoamento no funil é menor no BAC de referência, com esperado

(Figura 33). Tuyan et al. (2014) verificaram que o tempo de escoamento no funil V aumenta com a percentagem de substituição de AGR devido à sua superfície mais rugosa em comparação com os AN. Safiuddin et al. (2011) e Modani e Mohitkar (2014) verificaram que o tempo de escoamento no funil diminuía com a percentagem de substituição de AGR (até 20 a 40%) devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas, o tempo de escoamento no funil aumentou devido à maior quantidade de AGR e à sua maior rugosidade e angulosidade.

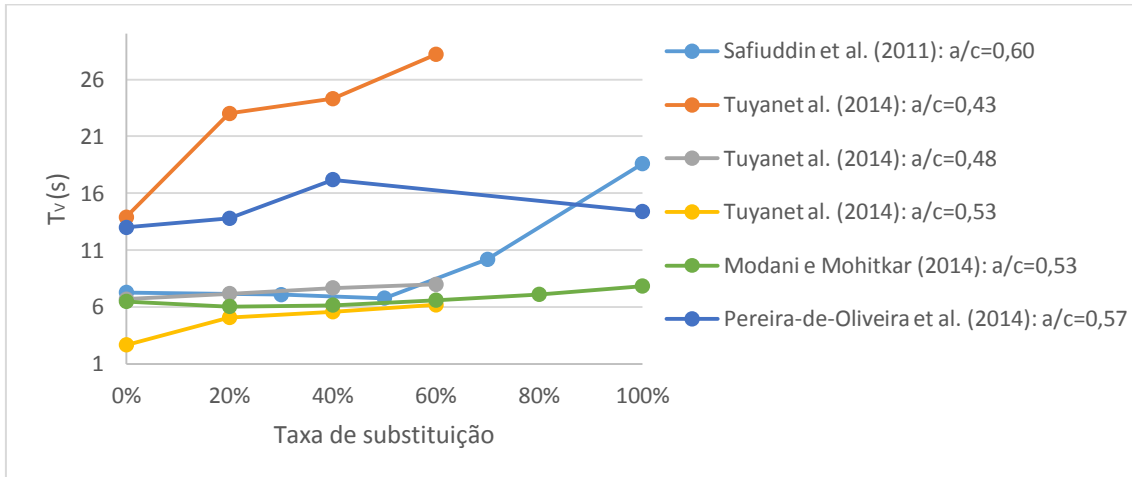


Figura 32 - Comparação dos resultados do ensaio de escoamento no funil V (tempo de funil)

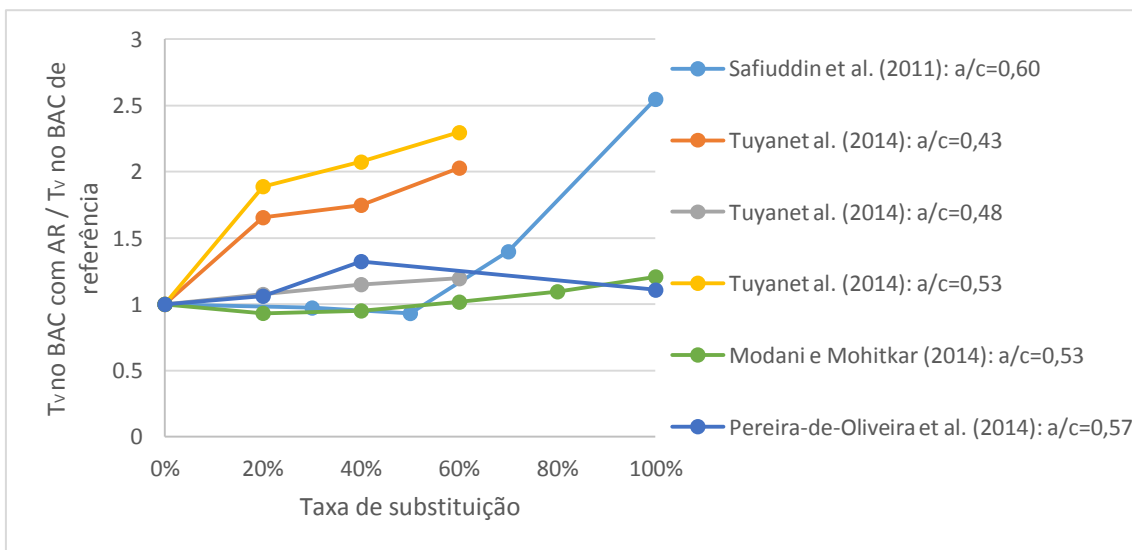


Figura 33 - Comparação dos resultados do ensaio de escoamento no funil V (quociente entre o  $T_v$  no BAC de referência e o  $T_v$  no BAC com AR)

### 2.2.1.3. Capacidade de escoamento através de espaços confinados

O ensaio na caixa L (de acordo com a norma NP EN 12350-10, 2010) permite avaliar a capacidade de passagem do BAC ao escoar através de espaços confinados, incluindo espa-

ços entre armaduras e outras obstruções, sem segregar ou bloquear. O parâmetro que permite avaliar a referida propriedade é o índice de capacidade de passagem na caixa L (PL).

Relativamente ao índice de capacidade de passagem na caixa L, verifica-se que este diminui com a introdução de AGR (mantendo a relação a/c e a quantidade de superplastificante constante). Tal deve-se à maior absorção de água dos AGR em relação aos AN. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas, influência do superplastificante; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Corinaldesi et al. (2002) verificaram que o BAC produzido com FC apresenta menor capacidade de escoamento através de espaços confinados (Figura 34).

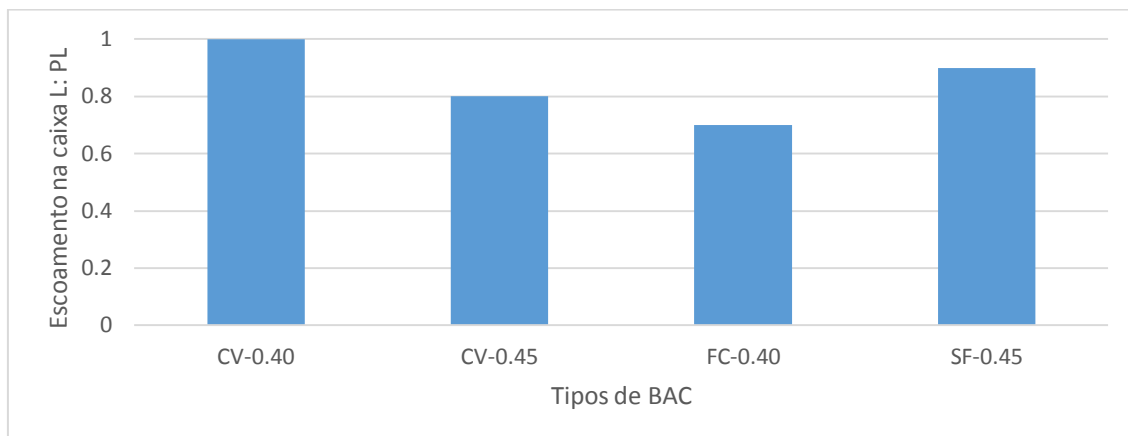


Figura 34 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Corinaldesi et al., 2002)

Corinaldesi et al. (2004) obtiveram valores de PL (Figura 35) dentro dos limites aceitáveis de acordo com a norma ( $PL \geq 0,80$ ), sendo que a amassadura que continha AGR e cinzas (SCC-MSWA) apresentou maior valor de PL em comparação com a amassadura que contém AGR e AFR (SCC-RP).

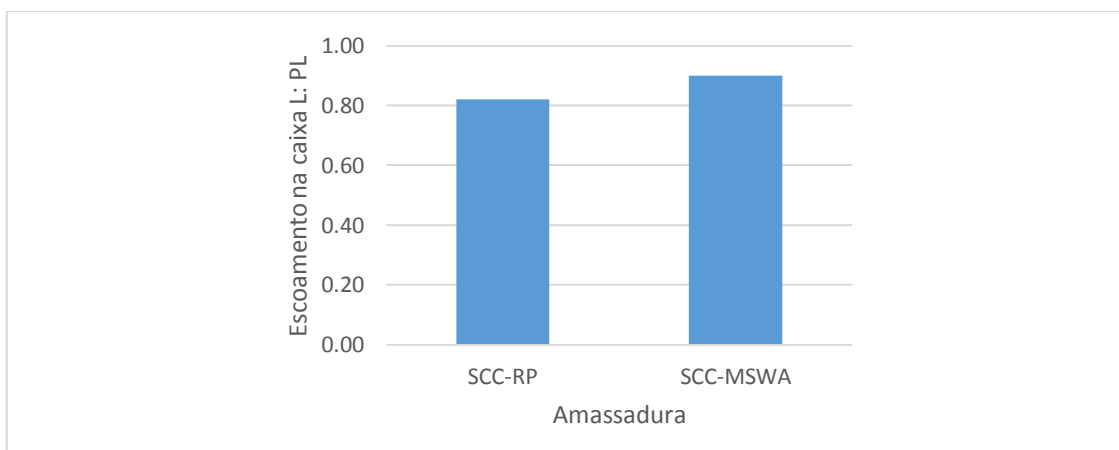


Figura 35 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Corinaldesi et al., 2004)

Em todas as amassaduras de Kou e Poon (2009), verifica-se boa capacidade de passagem através de espaços estreitos, pois obteve-se valores de PL superiores a 0,80 (NP EN 206-9, 2010), mais concretamente entre 0,85 e 0,94.

O valor de PL aumentou com a taxa de substituição de AFR, devido à menor absorção de água dos AFR nos primeiros instantes da amassadura (Figura 36). Nos primeiros instantes da amassadura, os AFR não absorveram a totalidade da água de absorção e, por conseguinte, essa água livre contribuiu para o aumento da capacidade de escoamento (aumento do valor de PL).

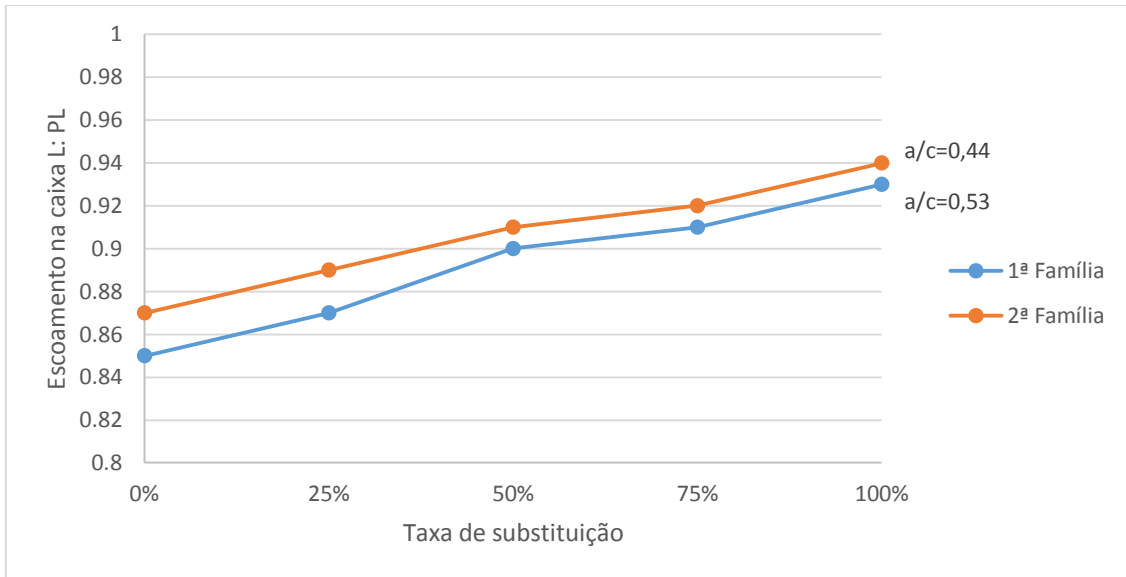


Figura 36 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Kou e Poon, 2009)

A adição de cinzas volantes (f-FA) causou um aumento do valor do espalhamento e do valor de PL, uma vez que este tipo de adições permite aumentar a viscosidade no estado fresco (Nepomuceno, 2005).

Na campanha de Grdic et al. (2010), verifica-se boa capacidade de passagem, com valores de PL entre 0,94 e 0,98, sendo que estes aumentam com a incorporação de AGR (Figura 37). Esta tendência é explicada pelo aumento da relação a/c.

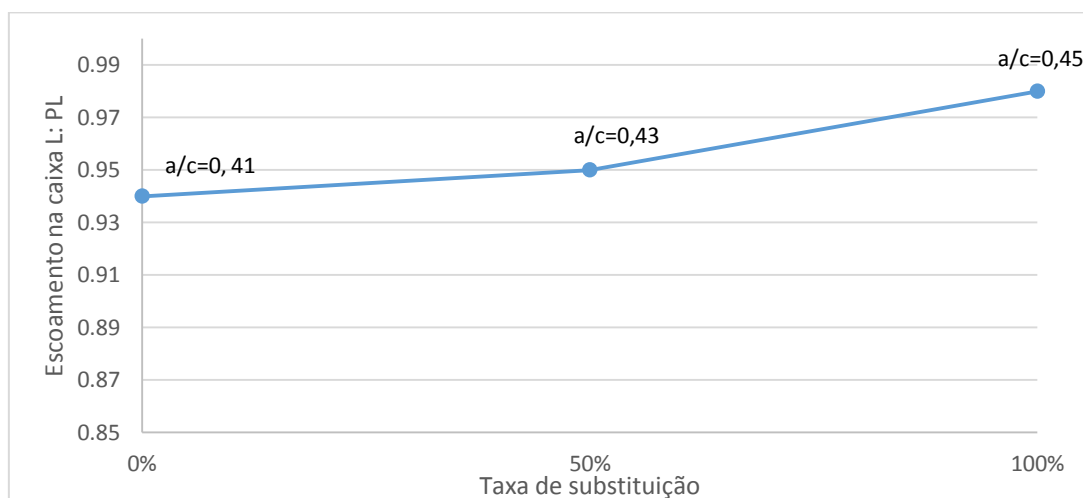


Figura 37 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Grdic et al., 2010)

Tuyan et al. (2014) verificaram que a capacidade de passagem aumenta com a diminuição da relação  $a/c$ . Para a mesma relação  $a/c$ , a capacidade de passagem aumenta (à excepção do resultado aparentemente anómalo para 40 e 60% de incorporação de AGR na 3ª família). Estes factos são explicados pelo gradual aumento de superplastificante (como verificado na Tabela 17). Por conseguinte, o aumento de superplastificante melhora a capacidade de passagem mesmo quando aumenta a percentagem de substituição de AGR. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 38.

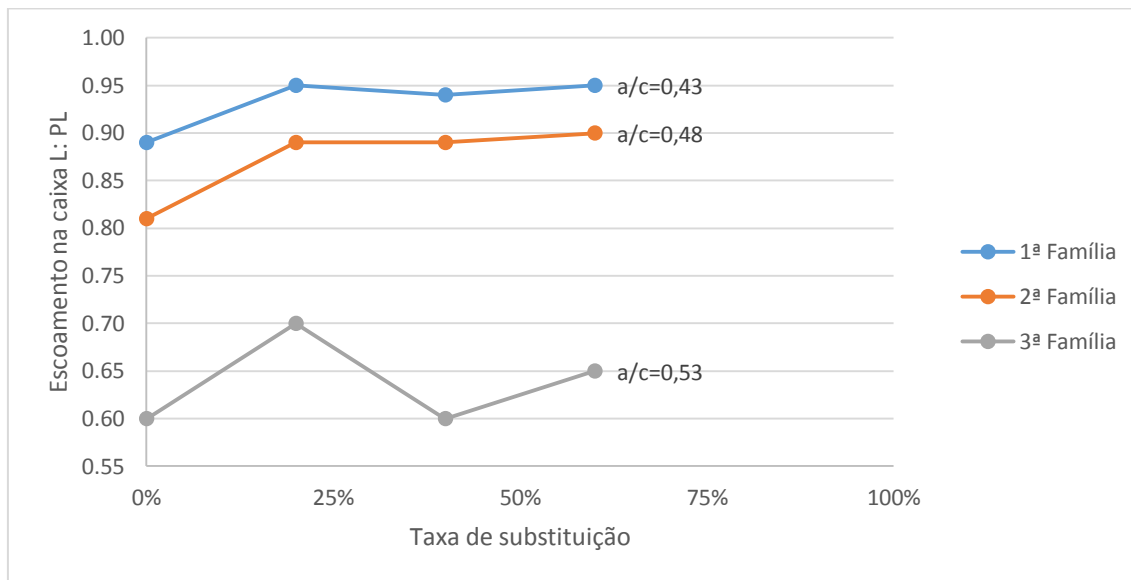


Figura 38 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Tuyan et al. 2014)

Modani e Mohitkar (2014) também obtiveram valores de PL (Figura 39) que satisfazem os limites exigidos pela norma. Observando a Figura 39, a amassadura em que foi usado 100% de AGR apresenta menor índice de PL; no entanto, foi introduzida maior quantidade de superplastificante nesta amassadura.

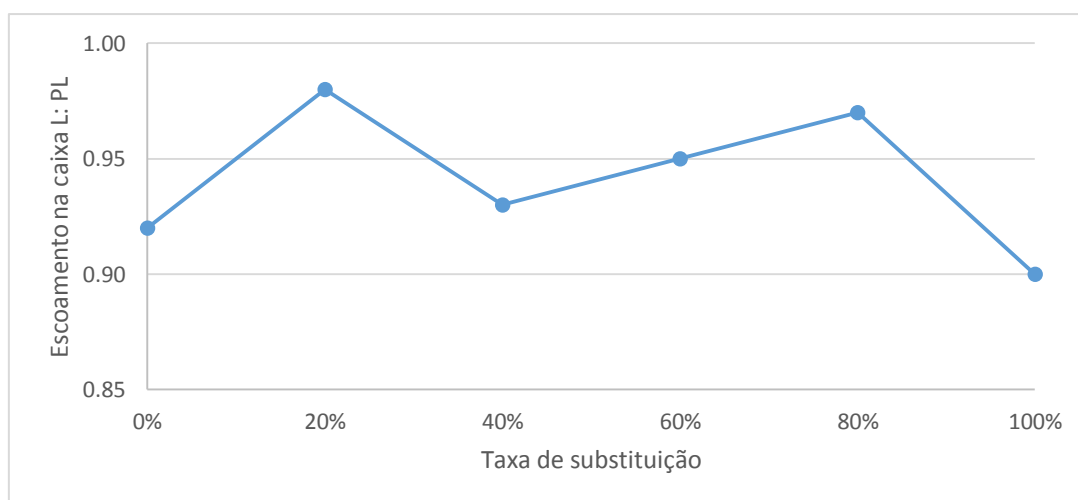


Figura 39 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Modani e Mohitkar, 2014)

Güneyisi et al. (2014), no seu estudo, obtiveram valores de PL na gama de 0,80 a 0,85 (Figura 40), o que satisfaz os requisitos presentes no guia EFNARC (2002).

Kebaïli et al. (2015) obtiveram valores de PL que não satisfazem os limites exigidos pela norma, excepto no BAC de referência (0% de AGR). Observando a Figura 41, o valor do PL diminui com o aumento da percentagem de substituição de AGR. Nos BAC com 60% e 100% de AGR, não foi possível obter o valor de PL: o BAC com 60% de AGR apenas fluiu parcialmente na secção horizontal no interior da caixa, e o BAC com 100% de AGR permaneceu bloqueado (pelas três barras de aço) dentro da secção vertical da caixa L.

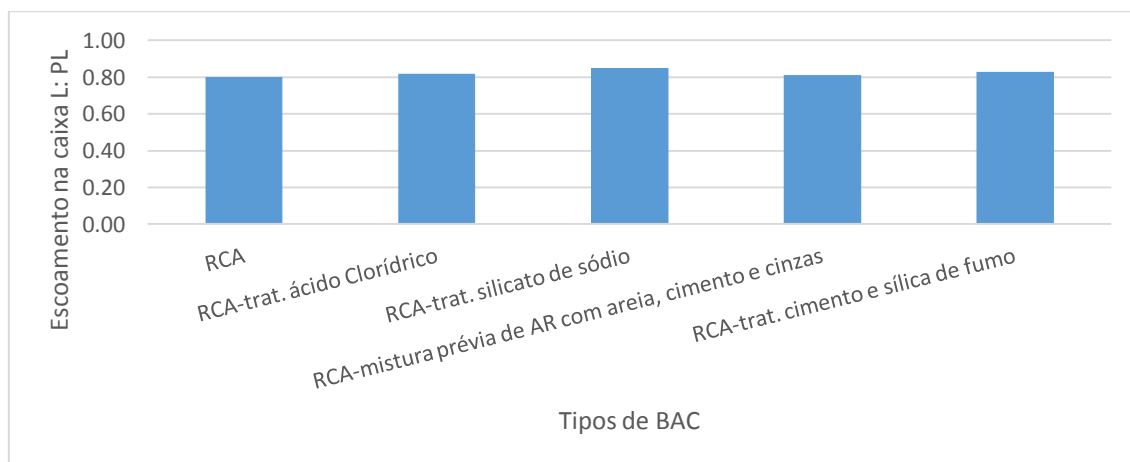


Figura 40 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Güneyisi et al., 2014)

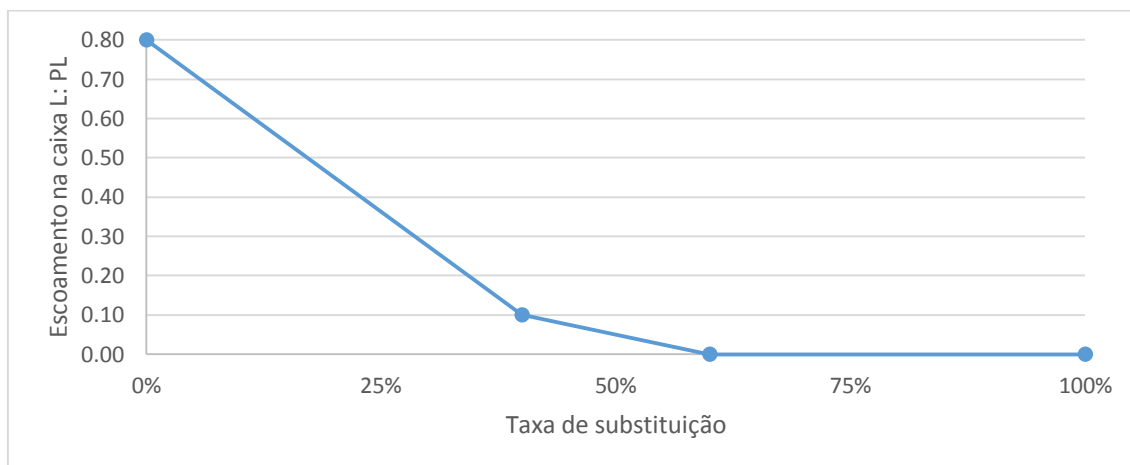


Figura 41 - Resultados do ensaio de escoamento na caixa L: índice de passagem (Kebaïli et al., 2015)

Na Figura 42 e na Figura 43, é apresentado o resumo dos resultados do índice de capacidade de passagem na caixa L, obtidos pelos autores em análise (para diferentes taxas de substituição de AR).

Os valores de PL tendem a aumentar com a taxa de substituição de AR como verificado nas campanhas de Kou e Poon (2009) e Grdic et al. (2010). Na campanha de Kou e Poon (2009), tal é justificado pela menor absorção de água dos AFR nos primeiros instantes da amassadura. Por outro lado, na campanha de Grdic et al. (2010), é justificado

pele gradual aumento da relação a/c com a percentagem de substituição de AR. Em todas as campanhas, verifica-se que o valor de PL é mais baixo no BAC de referência, excepto na campanha de Modani e Mohitkar (2014) em que se obteve um maior valor de PL para 100% de substituição de AGR, mesmo introduzido maior quantidade de superplastificante nesta amassadura. Os valores de PL aumentam com a redução da relação a/c (como expectável); essa tendência é verificada de forma mais evidente na campanha de Tuyan et al. (2014).

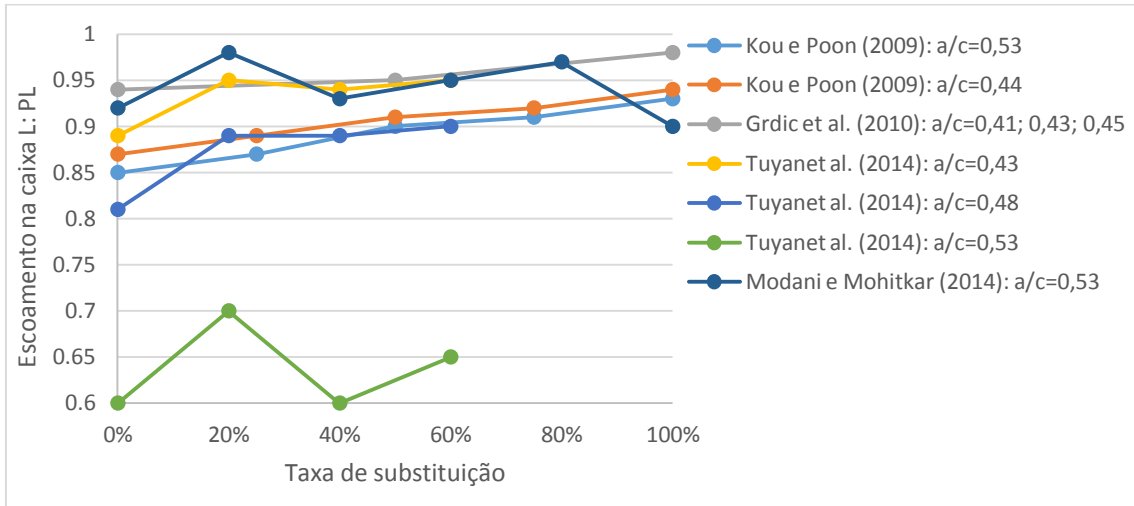


Figura 42 - Comparação dos resultados do ensaio de escoamento na caixa L (índice de passagem)

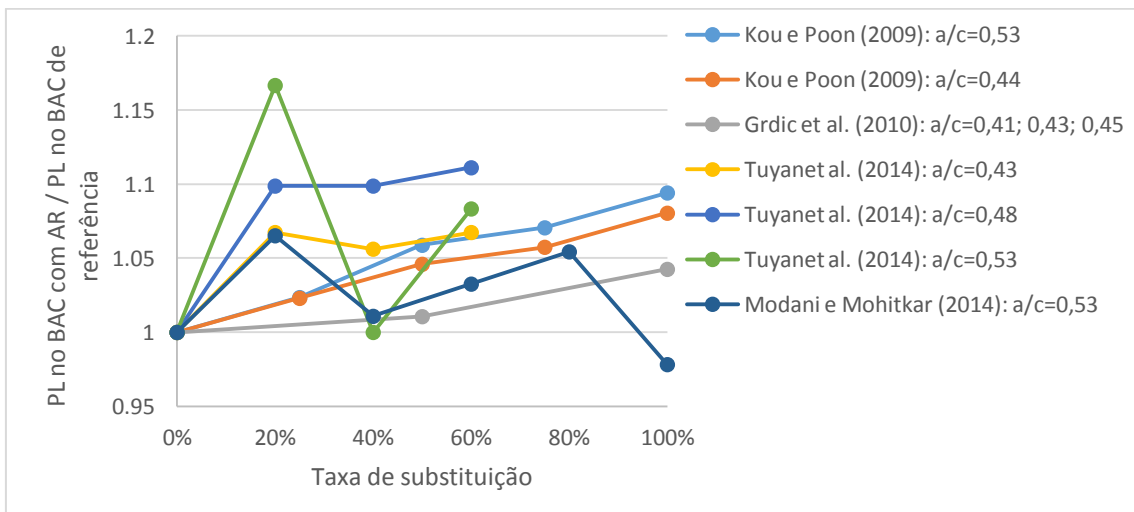


Figura 43 - Comparação dos resultados do ensaio na caixa L (quociente entre o PL no BAC de referência e o PL no BAC com AR)

#### 2.2.1.4. Resistência à segregação

O ensaio da resistência à segregação no peneiro (de acordo com a norma NP EN 12350-11, 2010) é utilizado para avaliar a resistência do BAC à segregação. O parâmetro que permite avaliar a referida propriedade é o índice de segregação (SR), isto é, o quociente entre a proporção da amostra que passou através do peneiro (parcela segregada) e a quantidade vertida.

O índice de segregação tende a diminuir com a introdução de AGR. Tal deve-se à maior absorção de água dos AR em relação aos AN. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas, influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

O valor de SR na campanha de Kou e Poon (2009) aumenta com a percentagem de substituição de AFR (Figura 44), dada a sua maior capacidade de absorção de água (à excepção do resultado aparentemente anómalo para 75 e 100% de incorporação de AFR na 2ª família). Durante a amassadura, os AFR não absorveram a totalidade da água de absorção e, por conseguinte, essa água livre contribuiu para o aumento do valor de SR.

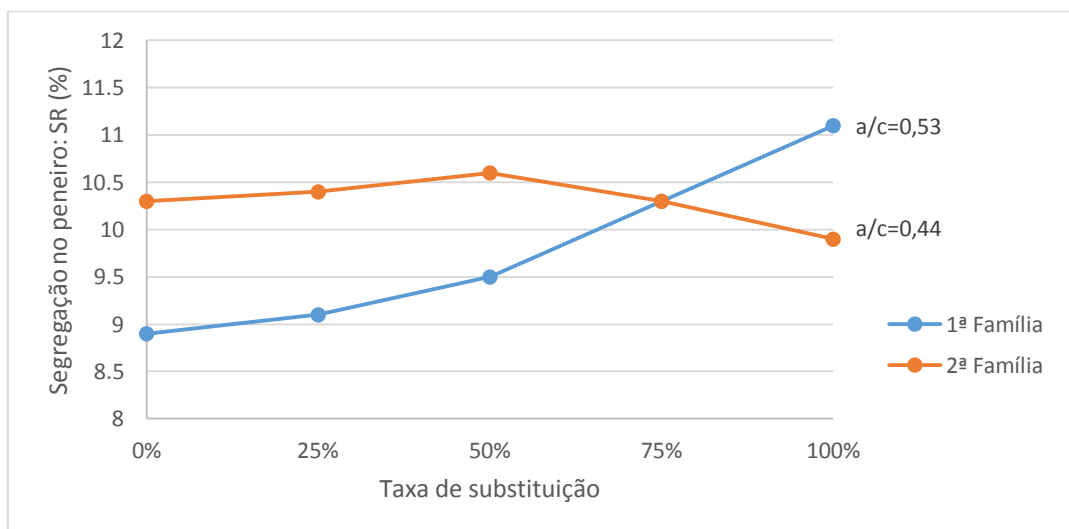


Figura 44 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (Kou e Poon, 2009)

Por outro lado, Grdic et al. (2010) verificam que o valor de SR diminui com a percentagem de substituição de AGR, entre 11,7% para 0% e 5,2% para 100% (Figura 45). Tal é explicado pelo gradual aumento de absorção de água por parte dos AGR.

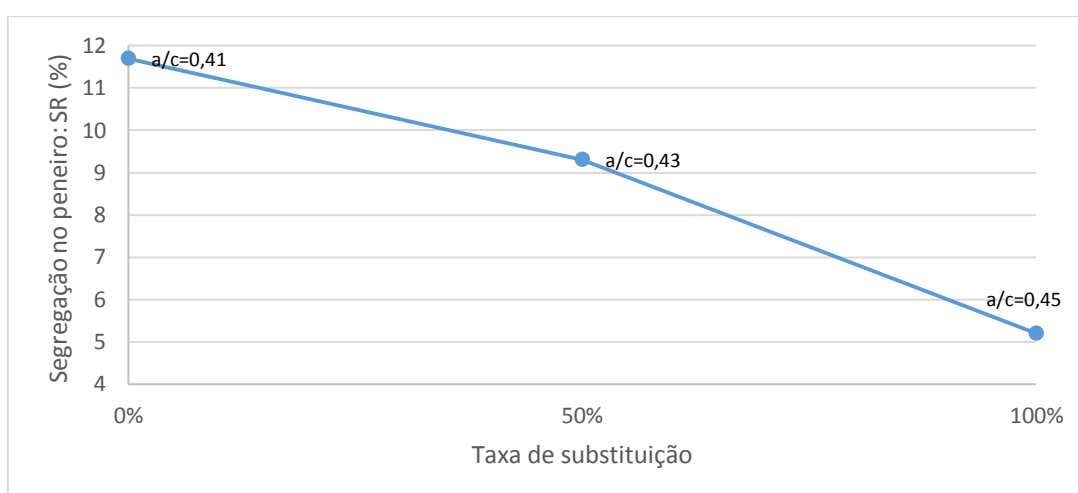


Figura 45 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (Grdic et al. 2010)



Safiuddin et al. (2011) verificaram que o valor de SR (Figura 46) aumenta com a percentagem de substituição (30 e 40%), devido à reduzida quantidade de AGR (BAC menos coesivo). Para percentagens de substituição mais elevadas (70 e 100%), o valor de SR diminui devido à maior quantidade de AFR provenientes da quebra dos AGR durante o processo de mistura. Por conseguinte, os agregados tornam-se mais angulosos e com superfície mais rugosa, conferindo assim uma maior coesão ao BAC. Um BAC menos coesivo possui um maior espalhamento, mas o decréscimo de coesão faz aumentar a segregação (separação da argamassa do AG).

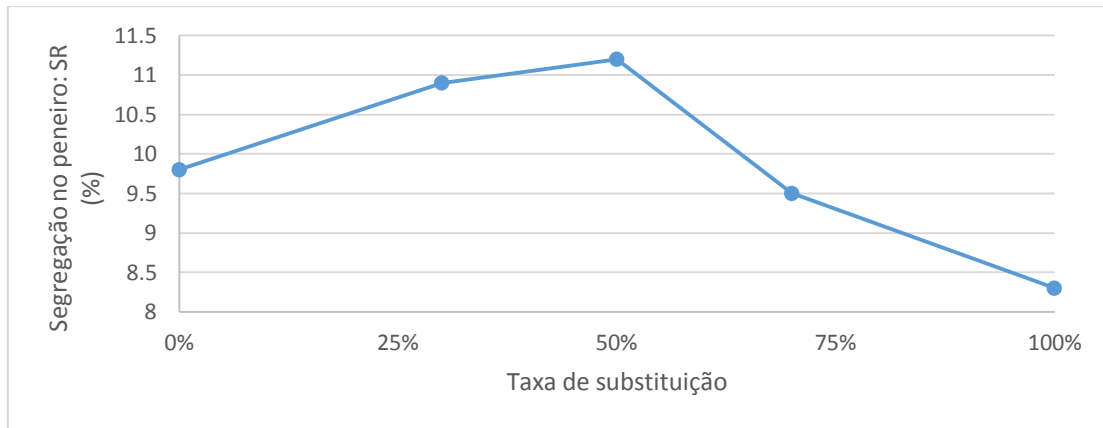


Figura 46 - Resultados do ensaio de segregação no peneiro: índice de segregação (Safiuddin et al., 2011)

Na Figura 47 e na Figura 48, é apresentado o resumo dos resultados do índice de segregação, obtidos pelos autores em análise (para diferentes taxas de substituição de AR).

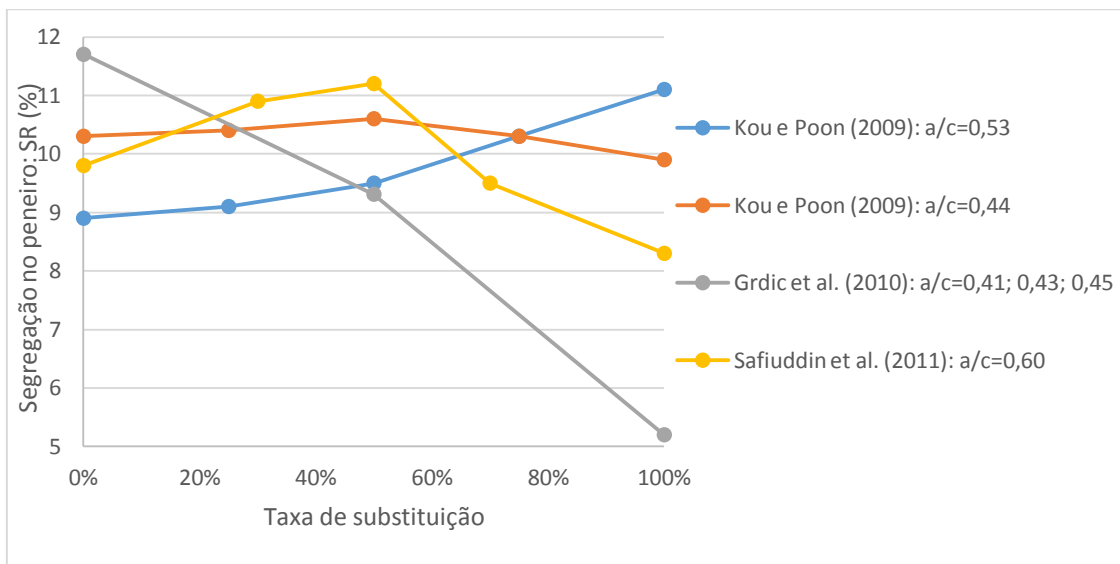
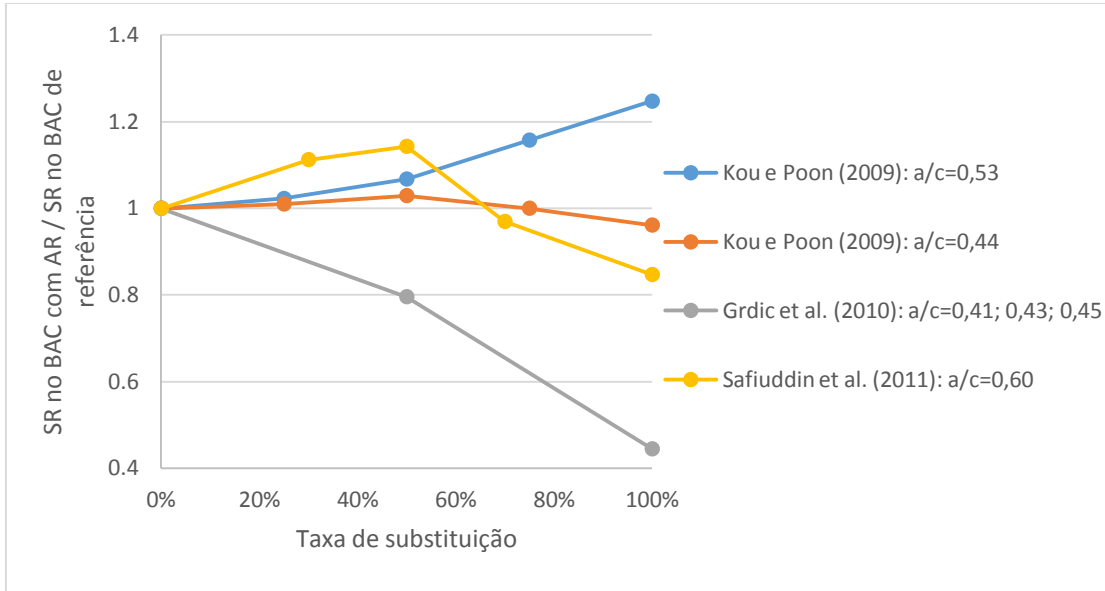


Figura 47 - Comparação dos resultados do ensaio de segregação no peneiro (índice de segregação)

Kou e Poon (2009) verificaram que o valor de SR aumenta com a percentagem de substituição de AFR devido à sua reduzida absorção de água nos instantes iniciais da amassadura. Por outro lado, Grdic et al. (2010) verificaram que o valor de SR diminui com a percentagem de substituição de AGR devido ao seu gradual aumento de absorção de

água. Na campanha de Safiuddin et al. (2011), ocorrem duas tendências: o valor de SR aumenta com a percentagem de substituição (30 e 40%), devido à reduzida quantidade de AGR; para percentagens de substituição mais elevadas (70 e 100%), o valor de SR diminui devido à maior quantidade de AFR provenientes da quebra dos AGR durante o processo de mistura.



**Figura 48 - Comparação dos resultados do ensaio de segregação no peneiro (quociente entre o SR no BAC de referência e o SR no BAC com AR)**

#### 4.3.1.5. Capacidade de passagem através de espaços estreitos

O ensaio de espalhamento no anel J (de acordo com a norma NP EN 12350-12, 2010) é utilizado para avaliar a capacidade de passagem do BAC através de espaços estreitos, incluindo os espaços entre os varões da armadura e outras obstruções, sem segregação ou bloqueio. Os parâmetros que permitem avaliar as referidas propriedades são o tempo que o BAC demora a atingir um círculo de 500 mm ( $T_{500}$ ), o espalhamento (SF) e a capacidade de passagem no anel (PJ), que corresponde ao desnível por bloqueio.

Verifica-se que o espalhamento no anel J diminui com a introdução de AGR. Tal é justificado pela maior absorção de água dos AR em relação aos AN. Na análise desta propriedade, é considerada a influência dos agregados e a da taxa máxima de substituição.

Safiuddin et al. (2011) verificaram que o diâmetro de espalhamento no anel J (Figura 49) aumenta (5 e 6%) com a percentagem de substituição de AGR (30 e 40% respectivamente), devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas (70 e 100%), o diâmetro de espalhamento no anel J diminui (9 e 13% respectivamente) devido à maior quantidade de AGR. Para maiores percentagens de substituição, ocorreu um aumento de finos gerados pela quebra de AGR durante o processo de amassadura; por conseguinte, mais água foi absorvida pelos AR. Tal fez com que o espalhamento diminuísse.

Na Figura 50, é apresentada a comparação entre o do diâmetro de espalhamento (sem

obstruções) e o diâmetro de espalhamento no anel J (espalhamento com obstruções) obtidos por Uygunoğlu et al. (2014). Verifica-se que a menor diferença entre os diâmetros de espalhamento é obtida para a maior relação a/c (0,40) independente do tipo de agregado. Também verifica-se que a maior diferença entre os dois diâmetros de espalhamento ocorre no BAC com AGR devido à sua superfície mais rugosa (em comparação com AGN e AGM).

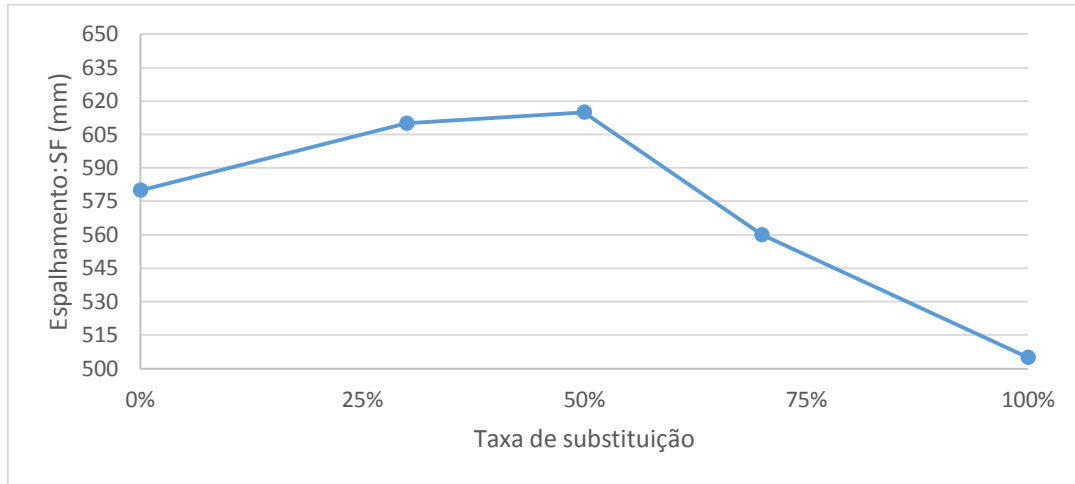


Figura 49 - Resultados do ensaio no anel J: diâmetro de espalhamento (Safiuddin et al., 2011)

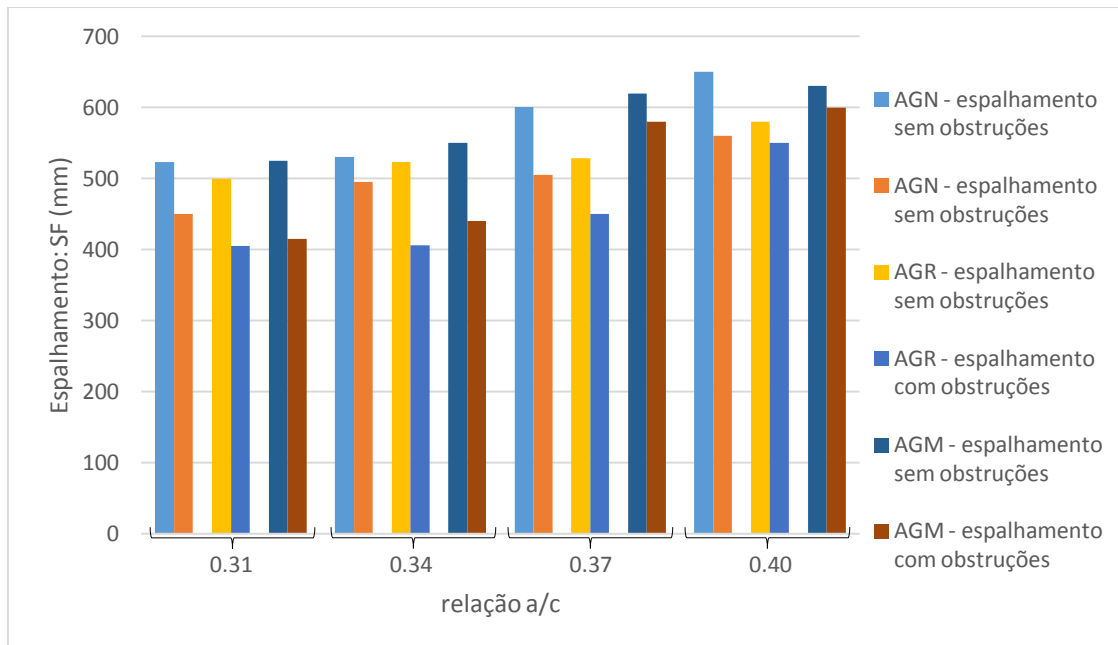


Figura 50 - Resultados do ensaio de espalhamento (espalhamento sem obstruções) e do ensaio de espalhamento no anel J (espalhamento com obstruções): diâmetro de espalhamento (Uygunoğlu et al., 2014)

Os resultados do diâmetro de espalhamento no anel J (obtidos no ensaio de espalhamento no anel J) e os do diâmetro de espalhamento (obtidos no ensaio de espalhamento) estão fortemente correlacionados (coeficiente de relação de 0,9909) com uma relação linear (Figura 51). Isto significa que ambos os espalhamentos variaram de forma

semelhante com o conteúdo de AGR, ou seja, a fluidez e capacidade de passagem estão diretamente interligados (Safiuddin et al., 2011).

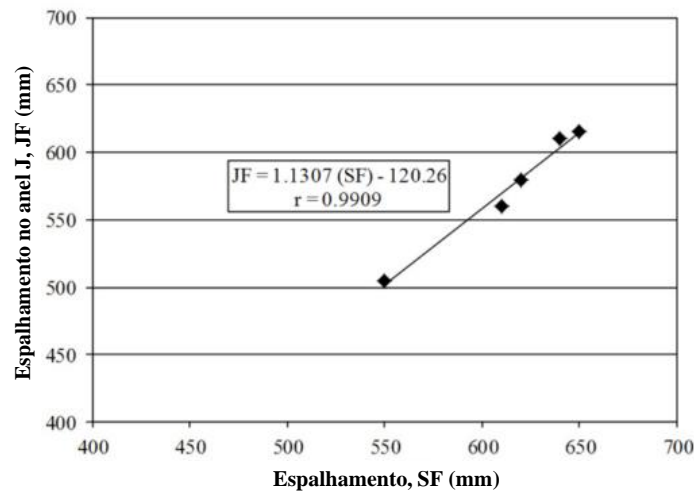


Figura 51 - Relação entre o ensaio de espalhamento e o ensaio de espalhamento em anel J (Safiuddin et al., 2011)

## 2.2.2. Propriedades do BAC com AR no estado endurecido

A massa volúmica apenas foi avaliada por Pereira-de-Oliveira et al. (2014).

A velocidade de propagação de ultra-sons foi avaliada por Corinaldesi et al. (2002), Corinaldesi et al. (2004), Tuyan et al. (2014) e Uygunoğlu et al. (2014).

A resistência à compressão foi a propriedade que mais autores analisaram: Corinaldesi et al. (2002), Corinaldesi et al. (2004), Kou e Poon (2009), Grdic et al. (2010), Panda e Bal (2013), Tuyan et al. (2014), Pereira-de-Oliveira et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014), Güneyisi et al. (2014), Uygunoğlu et al. (2014) e Herbudiman e Saptaji (2013).

A resistência à tracção por compressão diametral foi avaliada por Kou e Poon (2009), Panda e Bal (2013), Tuyan et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014), Güneyisi et al. (2014), Uygunoğlu et al. (2014), Herbudiman e Saptaji (2013).

A resistência à tracção por flexão foi avaliada por Grdic et al. (2010) e Panda e Bal (2013).

O módulo de elasticidade foi avaliado por Pereira-de-Oliveira et al. (2014) e Uygunoğlu et al. (2014).

A absorção de água por capilaridade foi avaliada por Tuyan et al. (2014), Pereira-de-Oliveira et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014).

A absorção de água por imersão foi avaliada por Grdic et al. (2010).

A resistência à penetração de cloretos foi avaliada por Kou e Poon (2009), Tuyan et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014).

Por fim, a retracção foi avaliada apenas por Kou e Poon (2009).

### 2.2.2.1. Massa volúmica

No que respeita à massa volúmica, verifica-se que esta diminui com a introdução de AR no betão dada a menor massa volúmica dos AR relativamente aos AN. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: idade do betão; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) verificaram que a massa volúmica diminui com a percentagem de substituição de AGR (1% para taxas de substituição de 20 e 40% e 3% para a taxa de substituição de 100%, aos 28 dias de idade). Esta tendência é justificada pelo facto de os AGR possuírem uma menor densidade do que os AGN (como mostrado na Tabela 18). Também se verifica uma perda de 0,7% da densidade entre os 7 e 28 dias (como expectável). Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 52.

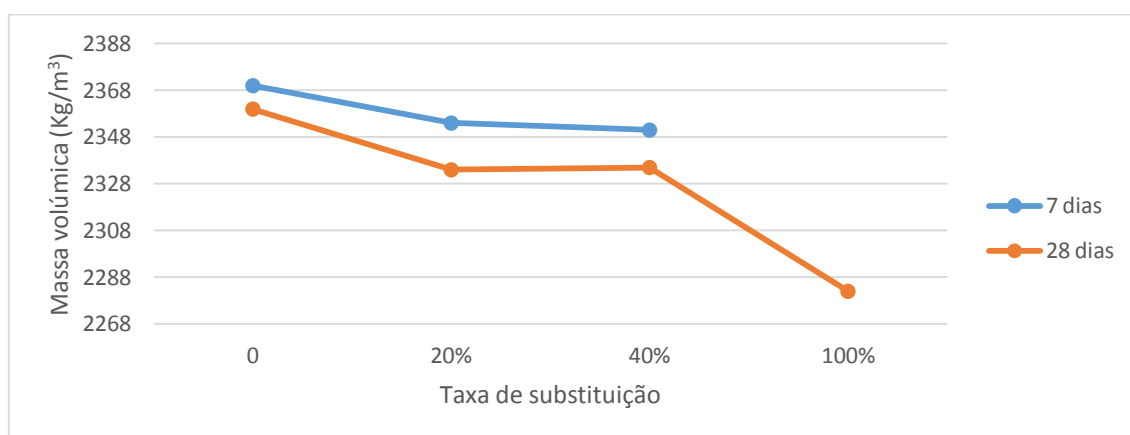


Figura 52 - Massa volúmica aos 7 e 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)

### 2.2.2.2. Velocidade de propagação de ultra-sons

Relativamente à velocidade de propagação de ultra-sons no interior do betão, verifica-se que esta diminui com a introdução de AR dada a menor densidade dos AR relativamente aos AN. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Analisando os resultados obtidos por Corinaldesi et al. (2002), na Figura 53 verifica-se que o BAC com FC apresenta maior dispersão de valores (com o aumento da distância entre transdutores) e tendência oposta em relação aos restantes BAC. Tal significa que o BAC com FC apresenta maiores heterogeneidades no seu interior.

Corinaldesi et al. (2004) verificaram que o BAC de referência (SCC-REF) produzido no seu estudo apresentava visualmente sinais de segregação, o que foi confirmado quantitativamente através do ensaio de ultra-sons (Figura 54). Observando a figura, verifica-se que o BAC de referência apresenta velocidades de propagação de ultra-sons menores à medida que aumenta a distância entre transdutores. O BAC de referência foi produzido apenas com AGN e areia de rio não tendo material fino (cinzas e AFR), pelo que se tornou menos compacto. O BAC com maior velocidade de propagação de ultra-sons é o

SCC-MSWA. Tal é justificado pela presença de cinzas.

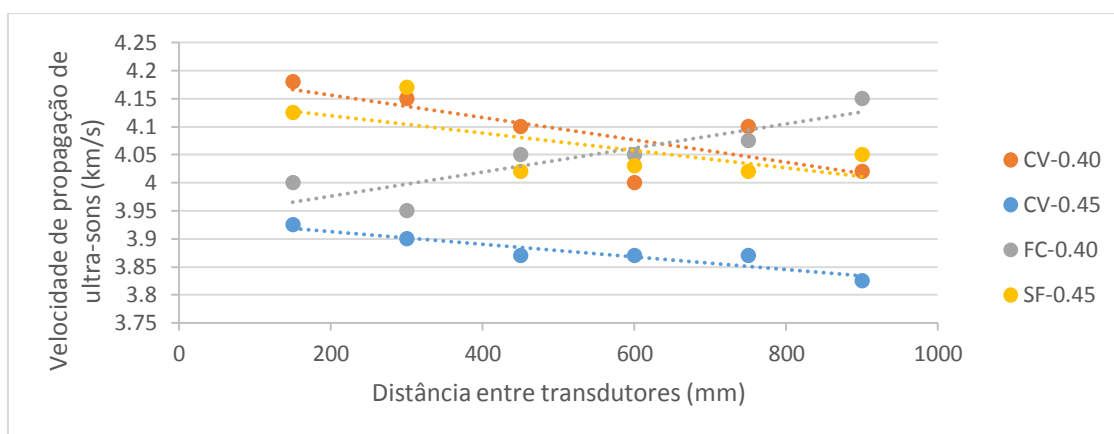


Figura 53 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Corinaldesi et al., 2002)

Analisando a Figura 54, verifica-se que ocorre uma ligeira diminuição da velocidade de propagação de ultra-sons com o aumento da distância entre transdutores em duas amassaduras (SCC-REF e SCC-MSWA). Esta tendência é justificada pela existência de heterogeneidades ao longo do BAC (segregação). O BAC em que foi usado AFR (SCC-RP) não apresentou sinais visíveis de segregação. Tal foi também confirmado com a velocidade constante de ultra-sons com o aumento da distância entre transdutores.

A velocidade de propagação de ultra-sons diminui com a percentagem de AGR (à excepção do resultado aparentemente anómalo para 20% de incorporação de AGR da 3ª Família). A diminuição da velocidade é de 9% na 1ª família, para 60% de substituição de AGR e de 4% na 2ª e na 3ª família, para 60% de substituição. Este facto é justificado pela menor densidade dos AGR. Com o aumento da relação a/c (mantendo a quantidade de cimento constante em todas as amassaduras), a velocidade de propagação diminui, como expectável, um vez que o meio é menos denso.

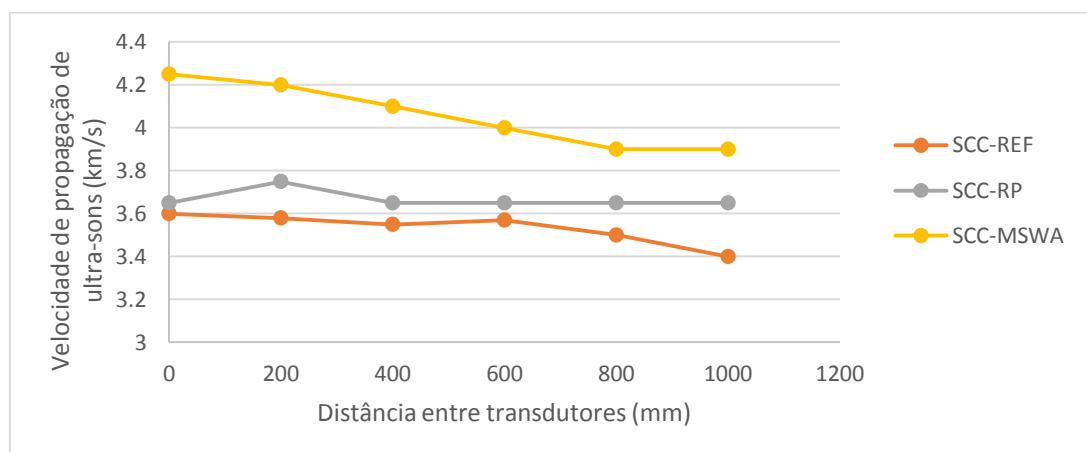


Figura 54 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Corinaldesi et al., 2004)

Os resultados obtidos por Tuyan et al. (2014) são apresentados na Figura 55.

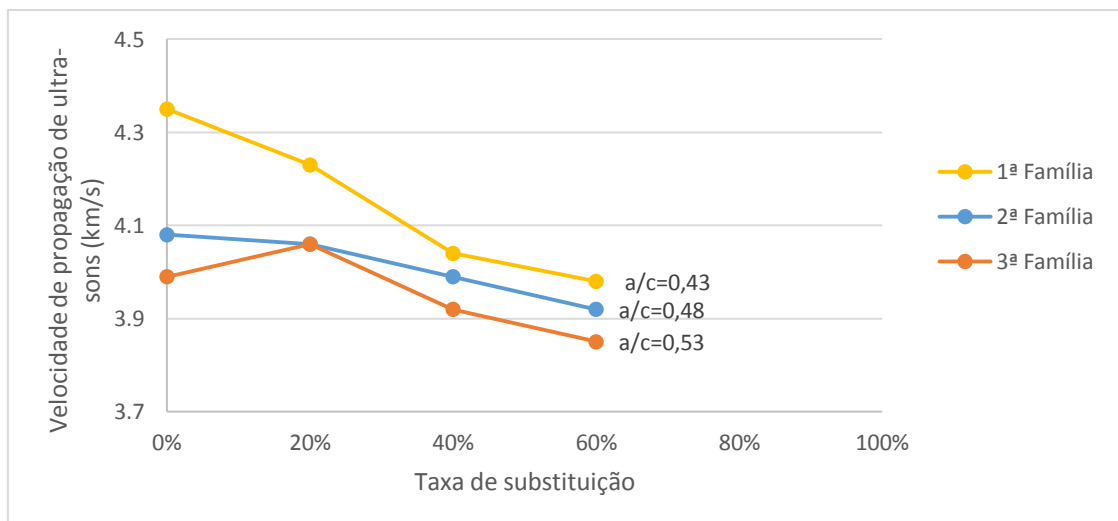


Figura 55 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Tuyan et al. 2014)

Na companhia de Uygunoğlu et al. (2014), verifica-se que a velocidade de propagação de ultra-sons é praticamente insensível à variação de  $a/c$  (Figura 56). A velocidade de propagação é maior no BAC com AGN, devido à maior aderência entre estes agregados e a pasta, tornando o BAC mais compacto. O BAC com AGR apresenta menor velocidade de propagação devido à natureza mais porosa dos AGR devido à argamassa antiga que se encontra aderida aos mesmos.

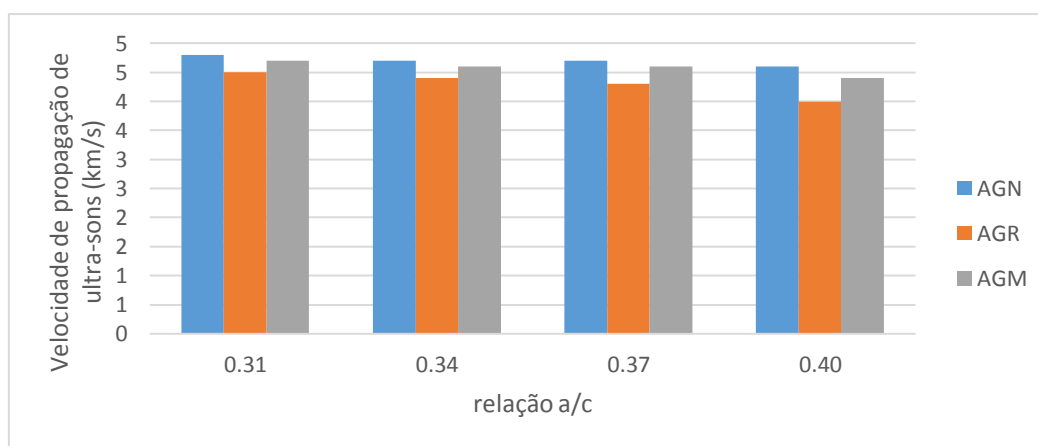


Figura 56 - Velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014)

### 2.2.2.3. Resistência à compressão

A incorporação de AR no betão é responsável por uma diminuição de desempenho na propriedade de resistência à compressão. Tal deve-se ao aumento da relação  $a/c$ , causado pela elevada absorção do material reciclado e pela sua forma achatada e angulosa. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: desenvolvimento da resistência ao longo do tempo; relação  $a/c$  das misturas; influência dos agregados; influência do betão de origem e taxa máxima de substituição.

Na maioria dos estudos consultados, a resistência à compressão é avaliada em provetes cúbicos; no entanto, a referida propriedade também é avaliada em provetes cilíndricos (com menor frequência).

Os resultados obtidos por Corinaldesi et al. (2002) são apresentados na Figura 57. Verifica-se que o BAC com SF apresenta maior resistência à compressão em idades mais avançadas (14 e 28 dias). Tal é justificado pelo facto de a actividade pozolânica ocorrer em idades mais avançadas. Comparando os dois BAC em que foi introduzido SF, verifica-se que o BAC com menor resistência é o que apresenta maior relação a/c (0.45).

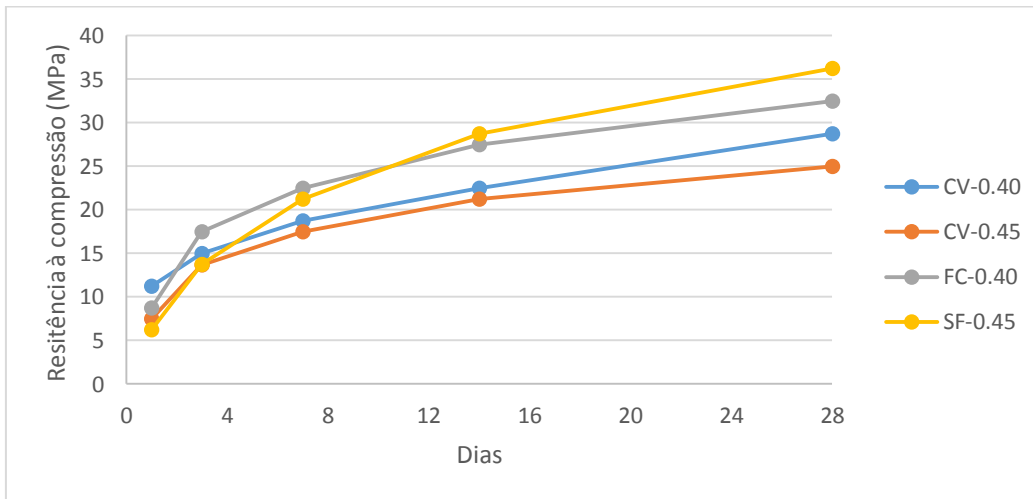


Figura 57 - Resistência à compressão aos 1, 3, 7, 14 e 28 dias (Corinaldesi et al., 2002)

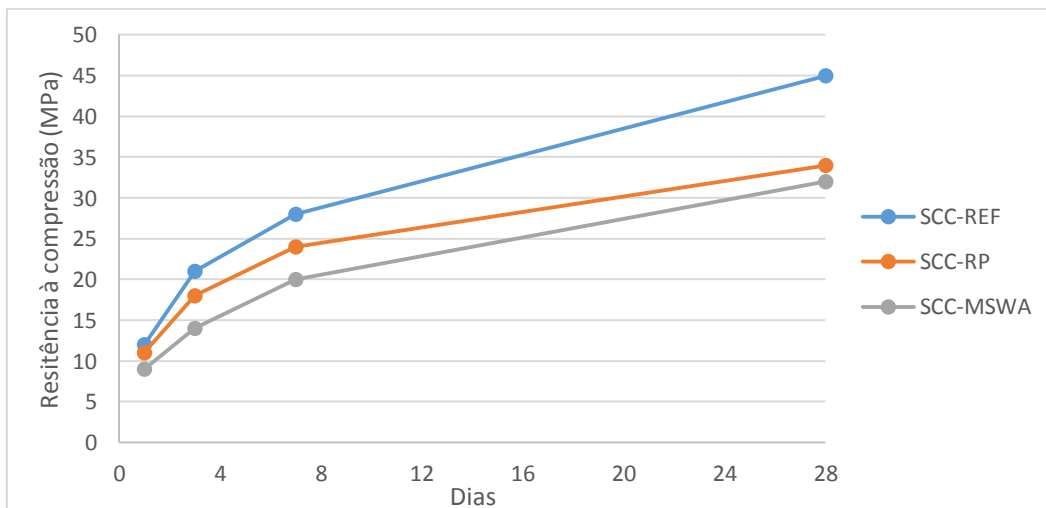


Figura 58 - Resistência à compressão aos 1, 3, 7 e 28 dias (Corinaldesi et al., 2004)

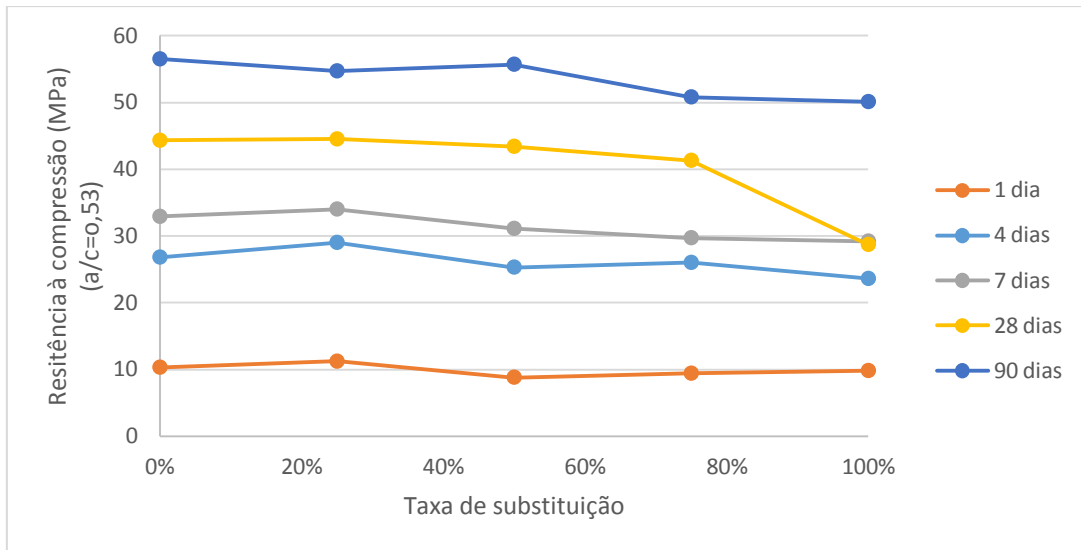
Observando os resultados da campanha de Corinaldesi et al. (2004), na Figura 58, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade (como expectável). Os resultados da resistência à compressão obtidos mostram que o BAC de referência em que não foram usados AR apresenta maior resistência à compressão. O BAC (SCC-MSWA) em que foram usados AR e cinzas (resultantes da inceneração de resíduos sólidos urbanos) apresenta menor resistência. Assim, verificou-se que o uso deste tipo de cinzas não contribui para o



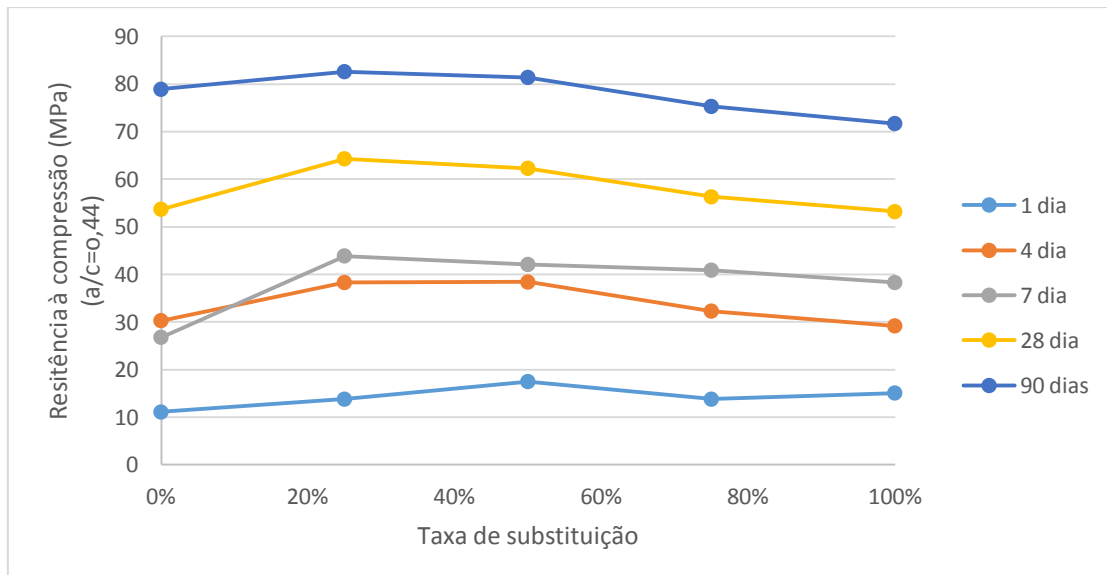
aumento da resistência à compressão, uma vez que não se verificou ocorrer actividade pozolânica (que provocaria o aumento da resistência caso existisse essa actividade).

O uso de AGR em vez de areia de rio provoca uma perda de resistência de 24% (SCC-RP) e de 29% (SCC-MSWA) aos 28 dias de idade. A principal razão para tal é a maior absorção dos AGR em comparação com a areia de rio (como se pode observar na Tabela 3).

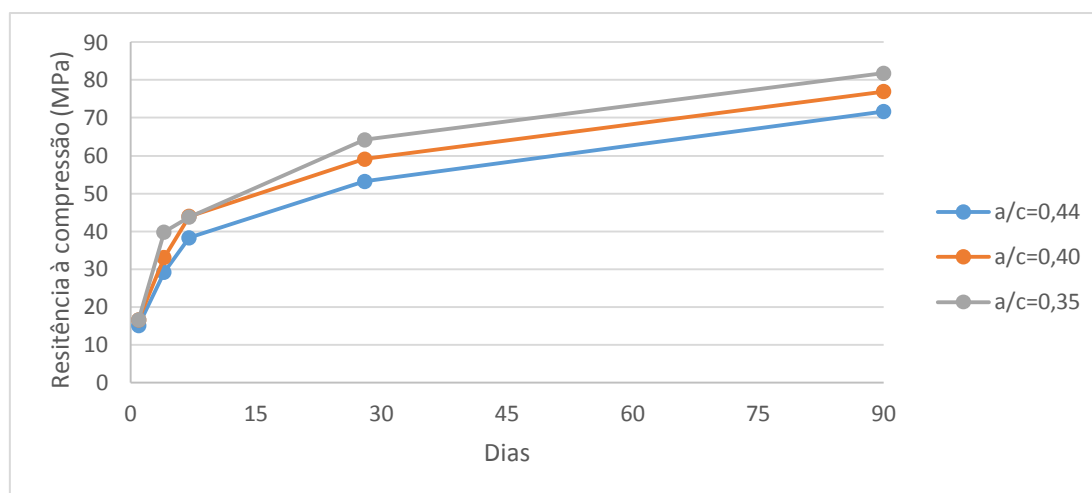
Os resultados dos ensaios obtidos por Kou e Poon (2009), para resistência à compressão, são apresentados na Figura 59, Figura 60 e Figura 61.



**Figura 59 - Resistência à compressão (em cubos) para  $a/c = 0,53$  (1ª família) aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias (Kou e Poon, 2009)**



**Figura 60 - Resistência à compressão (em cubos) para  $a/c = 0,44$  (2ª família) aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias (Kou e Poon, 2009)**



**Figura 61 - Resistência à compressão (em cubos) para  $a/c = 0,44; 0,40; 0,35$  para 100% de taxa de substituição (3ª família) aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias (Kou e Poon, 2009)**

A resistência à compressão diminui com a percentagem de substituição, em particular nas amassaduras da 1ª família. Na Figura 59 ( $a/c = 0,53$ ), à excepção do resultado aparentemente anómalo para 100% de incorporação de AFR aos 28 dias, o que se verifica é uma redução pouco acentuada à medida que a taxa de substituição aumenta. Esta situação parece acentuar-se com a idade, o que se poderá dever ao facto de, numa fase inicial, algum cimento não hidratado contido nos agregados reciclados ser activado, diminuindo este efeito com o tempo.

Em relação à Figura 60 ( $a/c = 0,44$ ), verifica-se globalmente que a resistência à compressão é relativamente insensível à taxa de substituição. Verifica-se ainda que os melhores resultados parecem ser atingidos para 25% de incorporação de AFR, o que se deverá à reacção atrás referida das cinzas com os AFR (e eventualmente um efeito de fíler incipiente) que, para percentagens maiores de substituição, é compensada pela perda de resistência dos AFR em relação à areia de rio.

A resistência à compressão do BAC da 2ª família foi superior à do BAC da 1ª família, devido à menor relação  $a/c$  (2ª família) e devido à presença de cinzas volantes (f-FA). As cinzas volantes usadas (tipo II) possuem propriedades pozolânicas, isto é, têm capacidade de reagir com o óxido de cálcio (presente nos AFR), o que faz aumentar a resistência (Kou e Poon, 2009).

Na campanha de Grdic et al. (2010), verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade, como seria expectável (Figura 62). Todas as composições desenvolvem resistências de forma rápida até aos 7 dias de idade, atingindo cerca de 90% da resistência em relação aos 28 dias de idade. Tal é justificado pela presença de fíler calcário. Também se verifica que a resistência diminui, de forma pouco acentuada, com a taxa de substituição (diminuição de 3,9% para 50% de AGR e de 8% para 100% de AGR). Esta tendência também se verifica na campanha de Kou e Poon (2009), sendo que, na campanha de Grdic et al. (2010), a justificação para tal é a mesma.

Os valores obtidos os 28 dias para 50 e 100% de substituição (47 e 45 MPa respectivamente) indicam que o betão feito com agregados reciclados provenientes de um betão

de origem com 45 MPa de resistência à compressão é tão resistente como esse mesmo betão de origem.

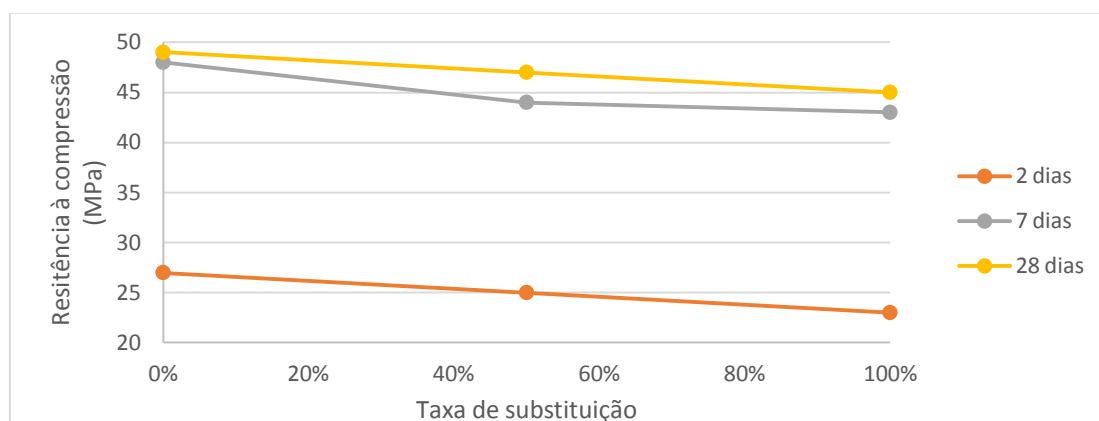


Figura 62 - Resistência à compressão em cubos aos 2, 7 e 28 dias (Grdic et al., 2010)

A resistência à compressão foi avaliada na campanha de Panda e Bal (2013) em proveites cúbicos e cilíndricos. Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 63.

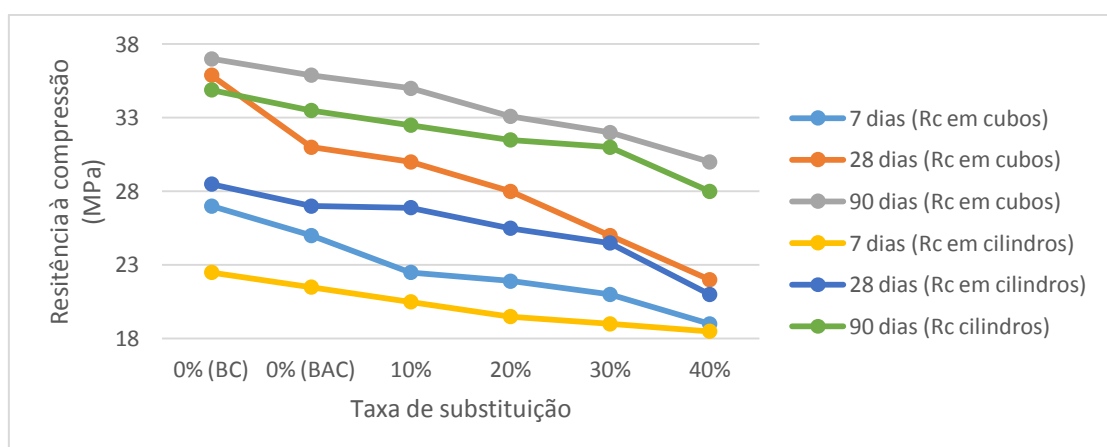


Figura 63 - Resistência à compressão em cubos e em cilindros aos 7, 28 e 90 dias (Panda e Bal, 2013)

Analisando a Figura 63, verifica-se que globalmente a resistência diminui com a taxa de substituição de AGR, sendo que esta diminuição de resistência se acentua com a idade, tal como verificado por Kou e Poon (2009). A resistência à compressão aumenta com a idade, como esperado. Verifica-se ainda, para todas as idades, que a resistência à compressão em cubos é superior à resistência à compressão em cilindros (como seria expectável), devido ao efeito de confinamento do material. As maiores resistências são obtidas para o betão convencional e para o BAC sem agregados reciclados.

Na campanha de Tuyan et al. (2014), verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a redução da relação a/c, como expectável (Figura 64).

Também é verificado um aumento, pouco acentuado, da resistência à compressão para as taxas de substituição de AGR até 40%. Tal é explicado pela existência de cinzas volantes na mistura. As cinzas volantes devido às suas propriedades pozolânicas têm capacidade de reagir com o óxido de cálcio (presente nos AR) contribuindo assim para o

aumento da resistência. Para maiores percentagens de substituição de AGR (a partir de 60%), a resistência à compressão diminui. O fenómeno é explicado pela microestrutura do BAC contendo AGR, nomeadamente na zona de transição entre o agregado reciclado e a pasta. Os poros e fissuras que se encontram nos AGR fazem enfraquecer a estrutura global do BAC, pelo que a resistência à compressão diminui. Resultados semelhantes foram obtidos por Kou e Poon (2009).

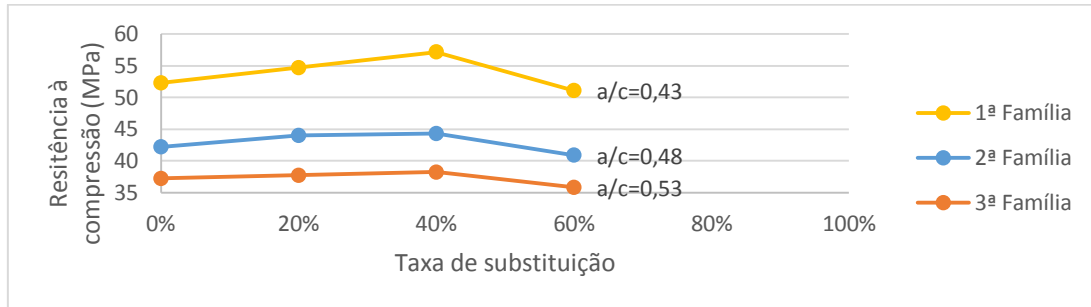


Figura 64 - Resistência à compressão em cubos aos 28 dias (Tuyan et al. 2014)

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) verificaram uma redução pouco acentuada da resistência à compressão com a percentagem de substituição de AGR: diferença de 5% entre o BAC com AN e o BAC com 100% de AGR. O que se conclui é que os AGR não influenciam significativamente o comportamento mecânico dado o elevado volume de pasta que envolvem os mesmos. Também se verificou que a resistência à compressão aumenta com a idade (como expectável). Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 65.

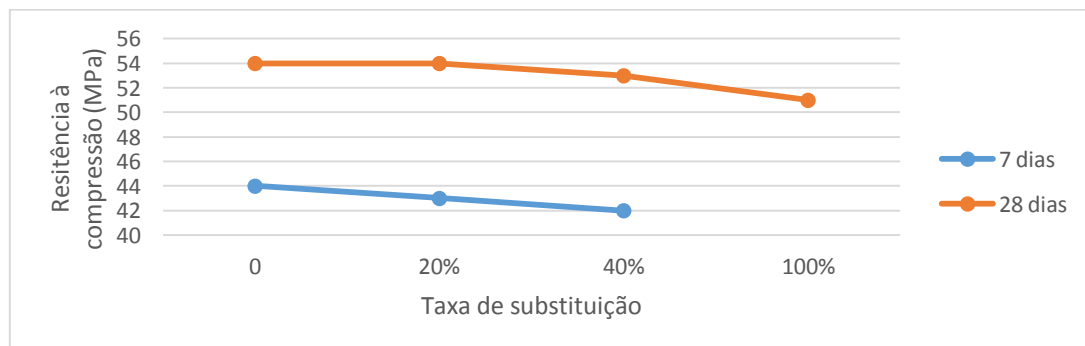


Figura 65 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)

Na campanha de Modani e Mohitkar (2014), verifica-se globalmente que a resistência à compressão é relativamente insensível à taxa de substituição, ou seja, ocorre uma redução pouco acentuada à medida que a taxa de substituição aumenta (Figura 66). Este efeito é mais pronunciado para as idades mais avançadas (28 e 90 dias). Tal é justificado pela presença de cimento não hidratado contido nos agregados reciclados que contribui para o aumento da resistência nas primeiras idades, diminuindo este efeito com o tempo. Observando a Figura 66, também se verifica que a resistência aumenta ao longo do tempo, sendo que atinge resistências mais elevadas aos 90 dias (como expectável).

Na campanha levada a cabo por Güneyisi et al. (2014), verifica-se que todos os métodos de tratamento efectuados aos AR (excepto o BAC com AR tratados com cimento e síli-

ca de fumo) permitem obter melhorias na resistência à compressão em relação ao BAC contendo AR que não sofreram qualquer tratamento (Figura 67).

A menor resistência do BAC contendo AR tratados com cimento e sílica de fumo é devida às características mais fracas da nova interface (criada na zona de ligação entre AR e a pasta do BAC).

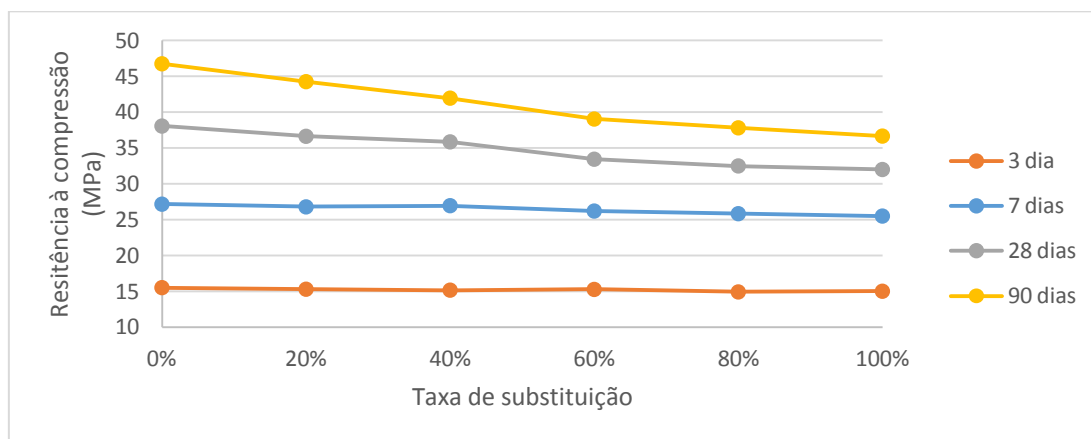


Figura 66 - Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias (Modani e Mohitkar, 2014)

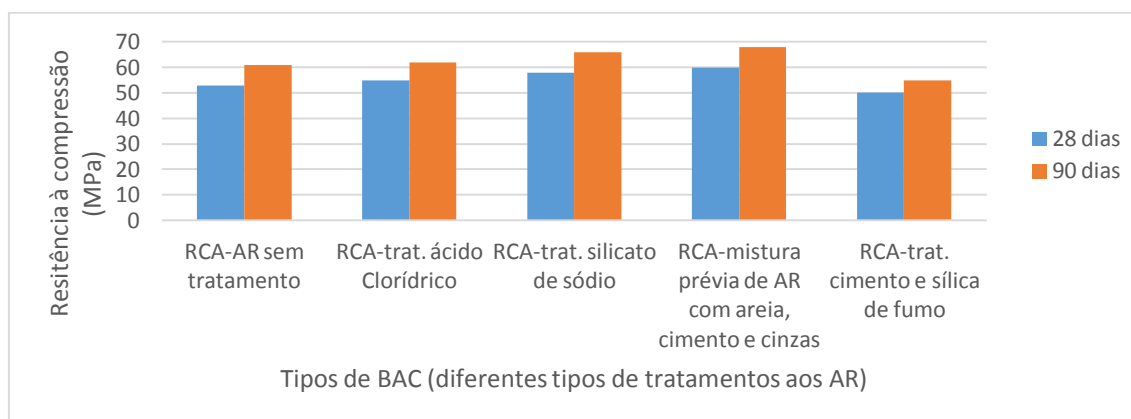


Figura 67 - Resistência à compressão aos 28 e 90 dias (Güneyisi et al., 2014)

Verifica-se que as maiores resistências (para os 28 e 90 dias de idade) foram atingidas no BAC em que os AR usados foram previamente misturados com uma mistura contendo areia, cimento e cinzas. Isto é justificado pelo facto de se formar uma nova camada de pasta de cimento sobre a superfície dos AR, preenchendo os seus vazios e fissuras, melhorando assim as características da superfície do AR.

Como expectável, para todas as amassaduras, a resistência é maior aos 90 dias devido ao aumento dos produtos de hidratação que se formam devido a um período de cura mais prolongado (melhorias na gama de 10-15%).

Para obter a máxima resistência à compressão, Herbudiman e Saptaji (2013), ao introduzirem resíduo de telha em pó (como substituto do cimento), verificaram que a quantidade óptima de telha em pó foi de 20% (observando a Figura 68, 2ª família, amassadura II) e que a dosagem óptima de superplastificante foi de 1% (observando a mesma figura,

## 1ª família: amassadura II)

Os autores verificaram que o processo de lavagem dos agregados faz aumentar a resistência à compressão comparando a amassadura VII (a única em que os agregados não sofreram processo de lavagem) com as restantes famílias.

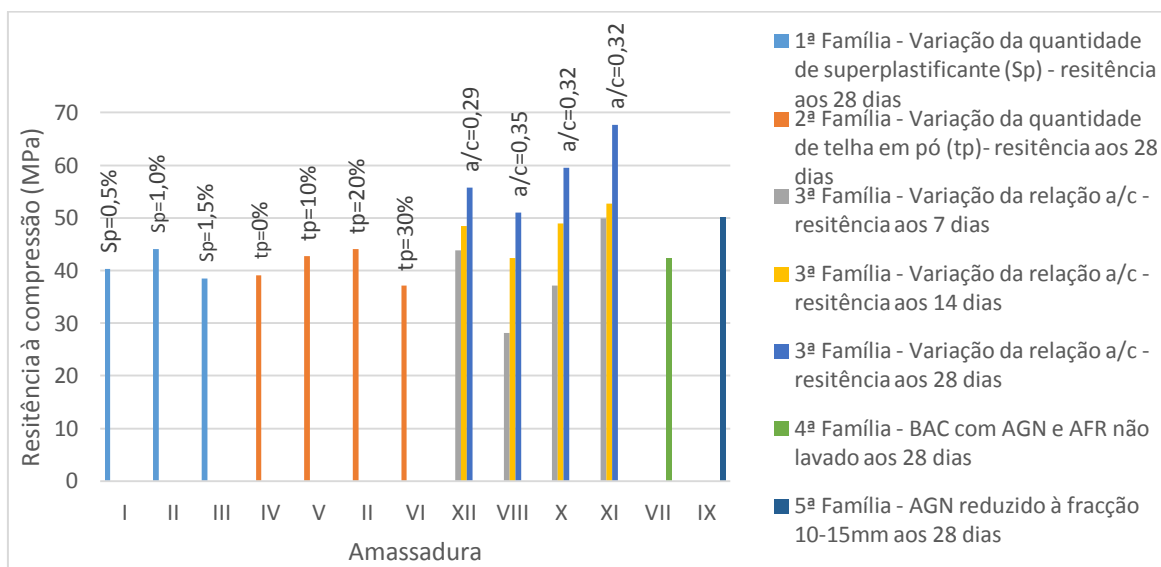


Figura 68 - Resistência à compressão aos 28 dias (Herbudiman e Saptaji, 2013)

Comparando a amassadura VII (agregado com dimensão máxima de 20 mm) com a IX (agregado reduzido à fracção 10-15 mm), os autores verificaram que a resistência à compressão é influenciada pela dimensão do agregado grosso (dando uma resistência superior na amassadura em que este foi reduzido).

Observando a 3ª família, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade (como expectável).

Na campanha de Uygunoğlu et al. (2014), verifica-se que a resistência à compressão é menor no BAC com AGR e AGM comparando com o BAC com AGN (Figura 69). Essa tendência é mais acentuada aos 28 dias de idade (como expectável). Verifica-se, para todas as famílias, que a resistência à compressão diminui com a relação a/c.

O BAC com AGR apresenta maior resistência á compressão que o BAC com AGM. Este facto é justificado pela forma mais alongada dos AGM, embora estes possuem menor resistência ao desgaste (Tabela 26), quando comparado com os AGR.

Analisando os diagramas tensão deformação obtidos por Uygunoğlu, et al. (2014), verifica-se que o BAC com AGR (Figura 71) e AGM (Figura 72) apresenta maior ductilidade comparando com o BAC que possui AGN (Figura 70). Para o mesmo valor de tensão, o BAC com AGR e AGM apresenta maior deformação. A forma cúbica dos agregados e a sua superfície mais rugosa retardam a micro fissuração na interface entre a matriz de cimento e o agregado (Neville e Brooks (1987), Erdogan (2003), Topçu e Uygunoglu (2008) referidos por Uygunoğlu et al. (2014)).

A relação tensão-deformação tende a ser linear caso a rigidez da matriz de cimento for próxima da rigidez do agregado, essa tendência é mais evidente no BAC com AGN e

com AGR, ou seja, comparando o BAC com AGN e AGR, verifica-se que o BAC que contém AGR apresenta maior capacidade de deformação devido à argamassa antiga que se encontra aderida aos agregados.

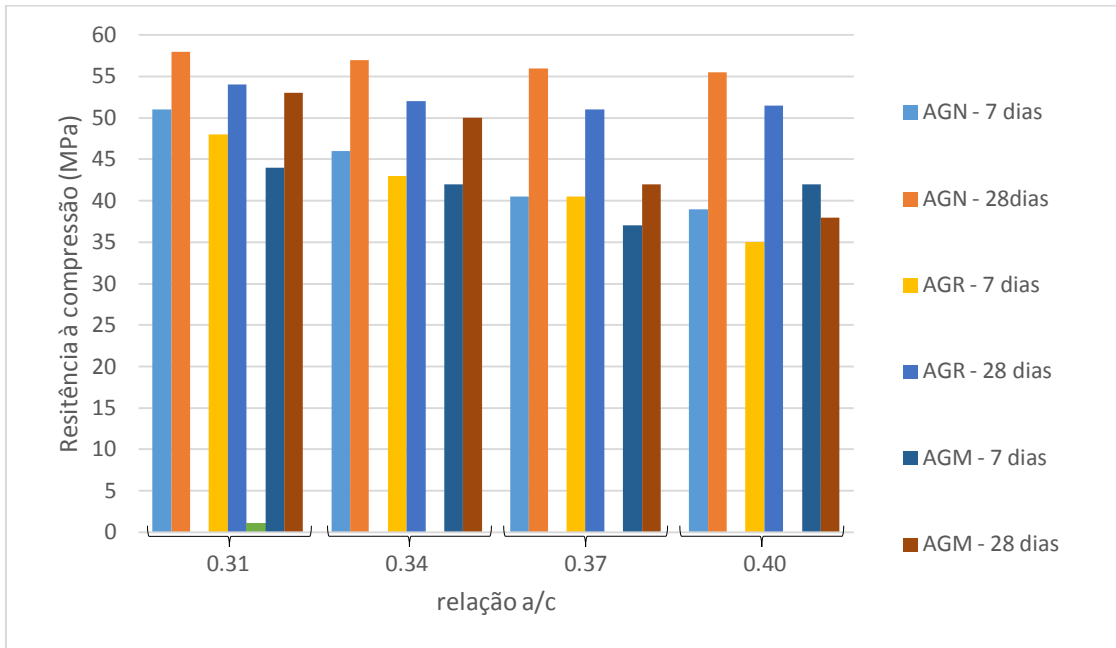


Figura 69 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014)

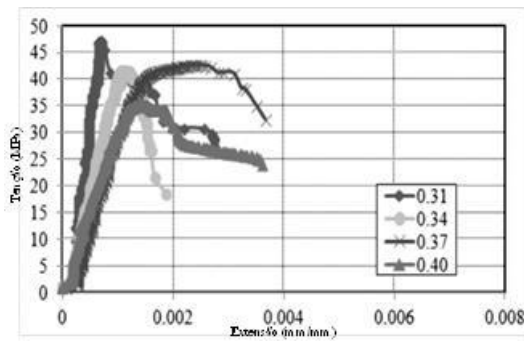


Figura 70 - Diagrama tensão-deformação do BAC com AGN (Uygunoğlu et al., 2014)

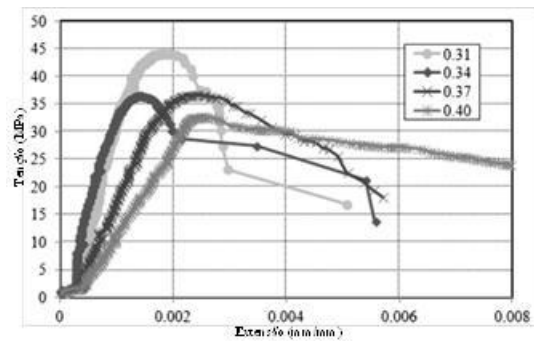


Figura 71 - Diagrama tensão-deformação do BAC com AGR (Uygunoğlu et al., 2014)

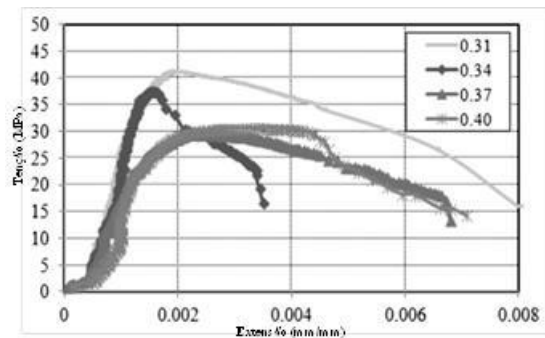


Figura 72 - Diagrama tensão-deformação do BAC com AGM (Uygunoğlu et al., 2014)

Na Figura 73 e na Figura 74, é apresentado o resumo dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias obtidos por diferentes autores (para diferentes taxas de substituição de AR).

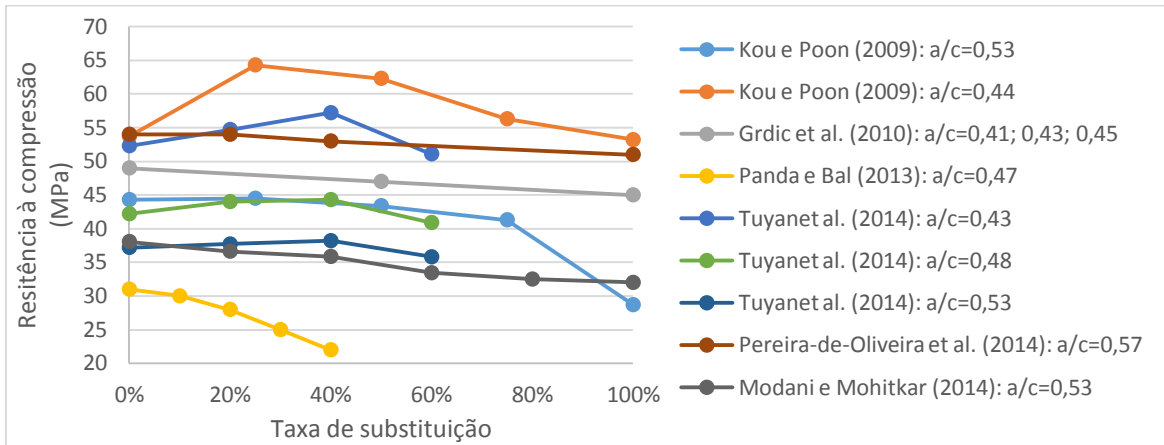


Figura 73 - Comparação dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias

De uma forma geral, verifica-se que a resistência à compressão diminui com a percentagem de substituição de AGR, como expectável (Grdic et al. (2010); Panda e Bal (2013); Pereira-de-Oliveira et al. (2014); e Modani e Mohitkar (2014)). No entanto, nas campanhas de Kou e Poon (2009) e de Tuyan et al. (2014), verifica-se que os melhores resultados de resistência à compressão são atingidos para percentagens de incorporação de AR de 25 e 40% respectivamente. Tal é justificado pela presença de cinzas volantes em ambas as misturas. As cinzas volantes, devido às suas propriedades pozolânicas, têm capacidade de reagir com o óxido de cálcio (presente nos AR) contribuindo assim para o aumento da resistência. Para percentagens maiores de substituição, esse efeito é compensado pela perda de resistência dos AR em relação aos AN.

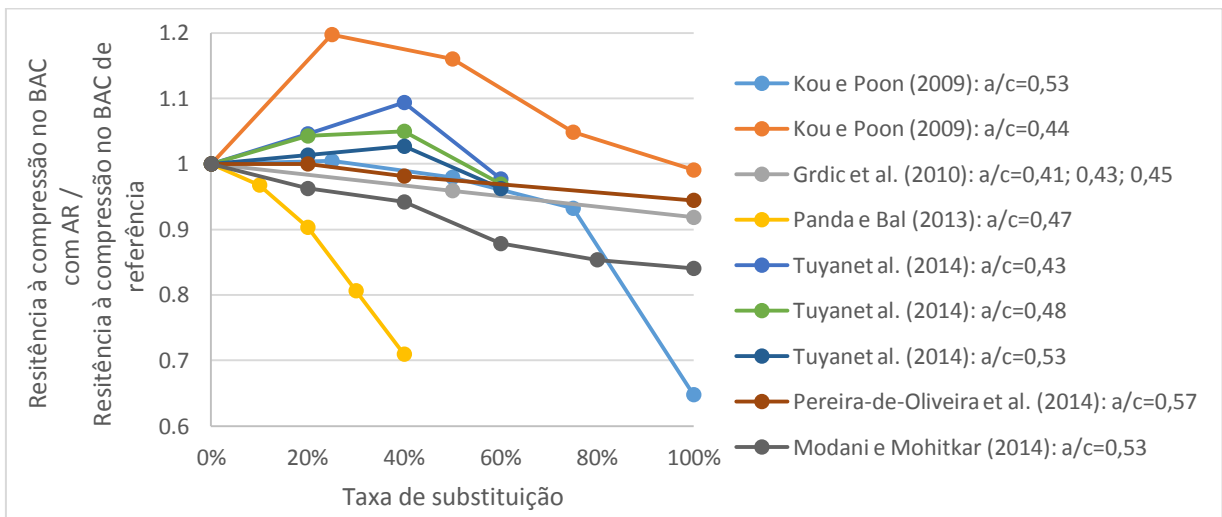


Figura 74 - Comparação dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias (resistência à compressão no BAC de referência e as resistências à compressão nos BAC com AR)



#### 2.2.2.4. Resistência à tracção por compressão diametral

Relativamente à tracção por compressão diametral, verifica-se uma diminuição nesta propriedade com a substituição de AN por AR. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: desenvolvimento da resistência ao longo do tempo; relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Os resultados da campanha de Kou e Poon (2009), para resistência à tracção por compressão diametral são apresentados na Figura 75.

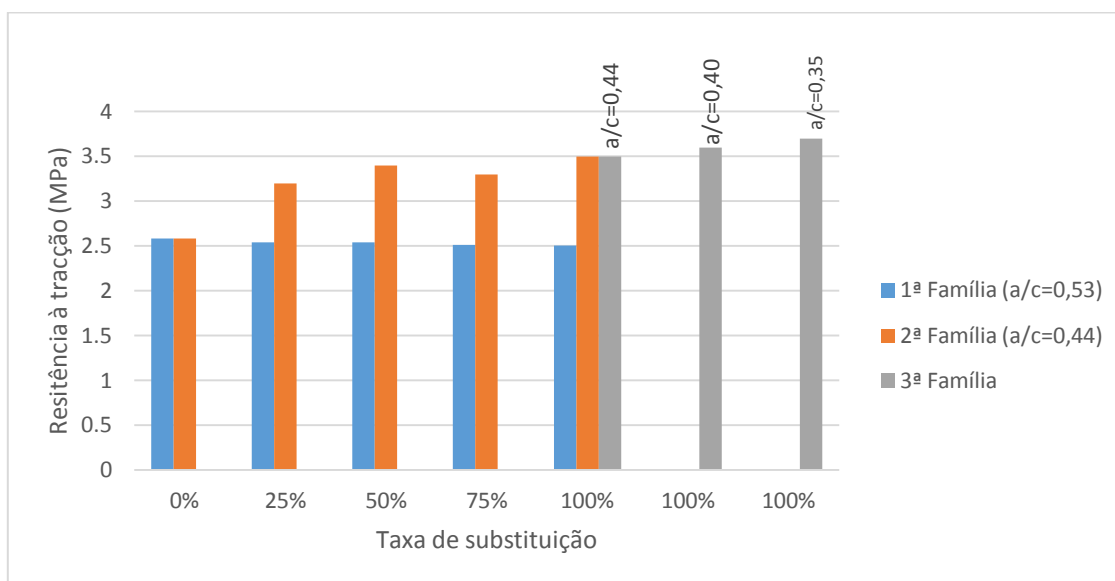


Figura 75 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Kou e Poon, 2009)

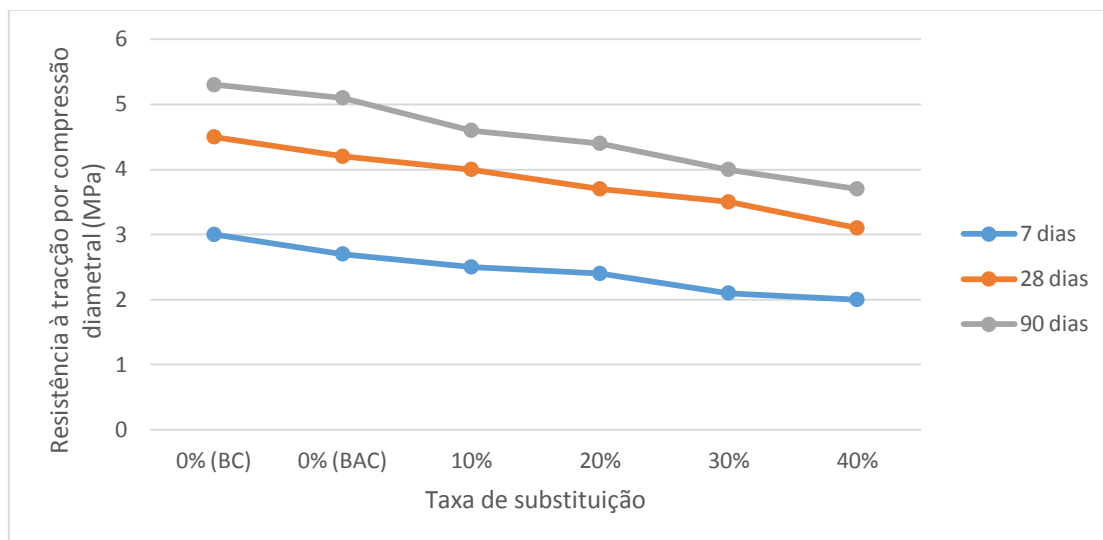
A resistência à tracção por compressão diametral diminui, de forma pouco acentuada, com a percentagem de substituição, em particular nas amassaduras da 1ª família, uma vez que esta é a única que não possui cinzas volantes (f-FA). A resistência à tracção por compressão diametral do BAC da 2ª família é superior à do BAC da 1ª família, o que é justificado pela redução da relação a/c e pela presença de cinzas volantes (f-FA). Estas duas tendências também ocorreram para a resistência à compressão. Na 3ª família, verifica-se que a resistência à tracção aumenta com a redução da relação a/c (como seria expectável).

Panda e Bal (2013), no seu estudo, avaliaram a resistência à tracção por compressão diametral a diferentes idades (7, 28 e 90 dias). Na Figura 76, são apresentados os resultados.

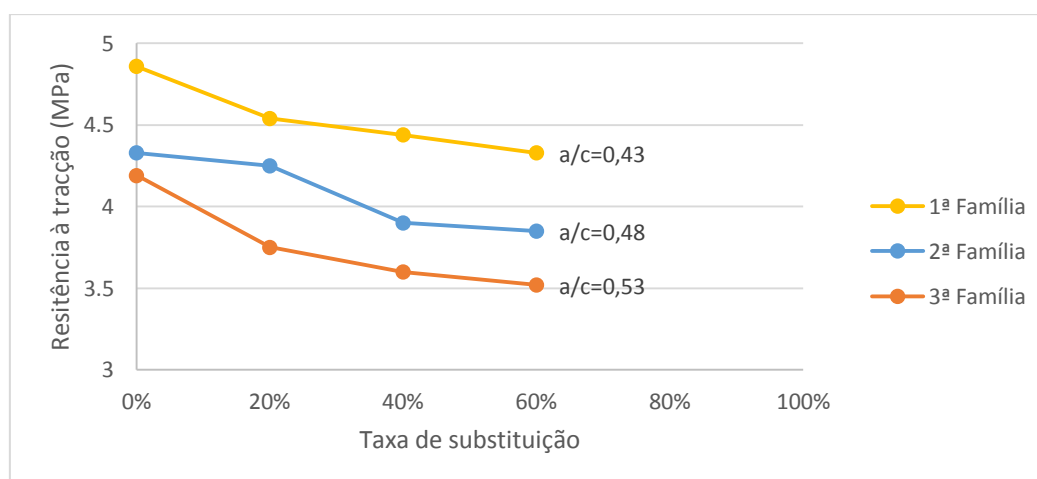
Através da figura, verifica-se que a incorporação de AGR foi responsável por uma diminuição na resistência à tracção por compressão diametral. Tal é explicado pela argamassa aderida aos agregados naturais originais, sendo que a rotura ocorre pela interface entre os agregados e a pasta aderida. Observa-se que a resistência aumenta com a idade (como previsto), sendo que aos 28 dias atinge 85% da resistência (em relação ao 90 dias).

Tuyan et al. (2014) verificaram que a resistência à tracção diminui com a percentagem de substituição de AGR, o que é justificado pela menor resistência dos AGR em comparação com os AGN, pela maior porosidade dos AGR e pela zona de ligação entre AGR e a argamassa antiga que se encontra aderida aos mesmos. Com o aumento da relação

a/c, a resistência à tracção diminui de forma mais pronunciada. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 77.



**Figura 76 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 7, 28 e 90 dias (Panda e Bal, 2013)**



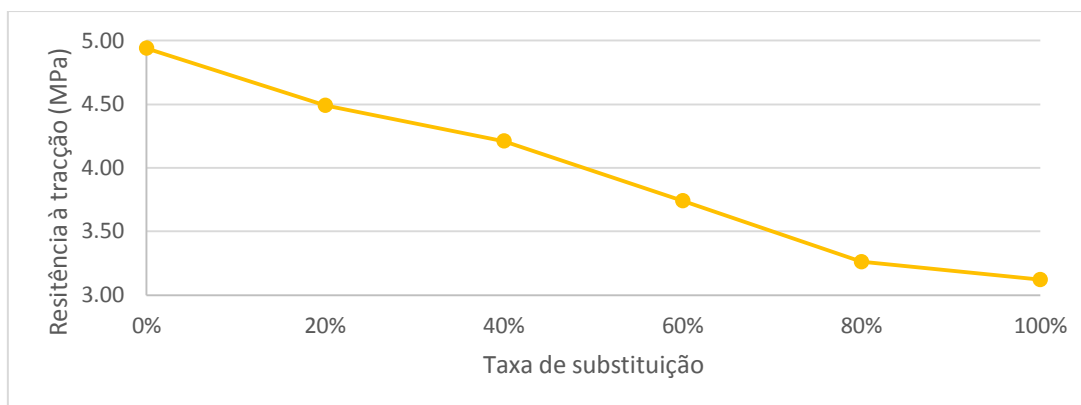
**Figura 77 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Tuyan et al. 2014)**

Modani e Mohitkar (2014) verificaram que a resistência à tracção diminui com a percentagem de AGR devido à menor resistência dos AGR em comparação com os AGN (Figura 78). Os autores verificaram que a rotura do BAC ocorre na zona de ligação entre o agregado reciclado e a argamassa aderida aos mesmos.

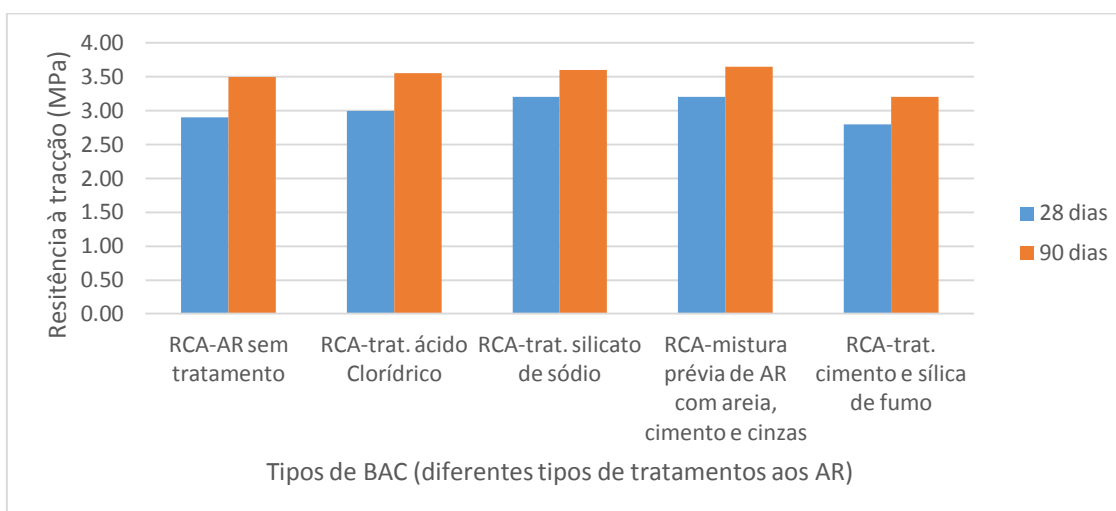
Os resultados de resistência à tracção obtidos por Güneyisi et al. (2014) têm uma tendência semelhante aos resultados da resistência à compressão obtidos pelos mesmos autores. Observando a Figura 79, verifica-se, para todas as amassaduras, a resistência é maior aos 90 dias (como expectável).

A maior resistência é obtida para o BAC que contém AR que foram previamente adicionado a uma mistura de areia, cimento e cinzas. Isto é justificado pelo facto de se formar uma nova camada de pasta de cimento sobre a superfície dos AR, preenchendo

os seus vazios e fissuras, melhorando assim as características da superfície do AR.



**Figura 78 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (Modani e Mohitkar, 2014)**



**Figura 79 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 90 dias (Güneyisi et al., 2014)**

A menor resistência é obtida para o BAC que contém AR que sofreram tratamento com cimento e sílica de fumo. Isto é justificado pelas características mais fracas da nova interface (criada na zona de ligação entre AR e a pasta do BAC).

Uygunoğlu et al. (2014), no seu estudo, verificaram que, para todos os tipos de BAC (com AGN, AGR e AGM), a resistência à tração diminui com a relação a/c (Figura 80). O BAC com AGM apresenta menor resistência à tração uma vez que o agregado apresenta menor resistência mecânica em comparação com os agregados calcários, e também devido à menor aderência entre este tipo de agregado e a pasta.

Herbudiman e Saptaji (2013), para obterem a máxima resistência à tração, verificaram que a quantidade ótima de telha em pó é de 20% (observando a Figura 81, 2ª família, amassadura II) e que a dosagem ótima de superplastificante é de 1% (observando a mesma figura, 1ª família: amassadura II).

Na Figura 82 e na Figura 83, é apresentado o resumo dos resultados da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias obtidos por diferentes autores (para dife-

rentes taxas de substituição de AR).

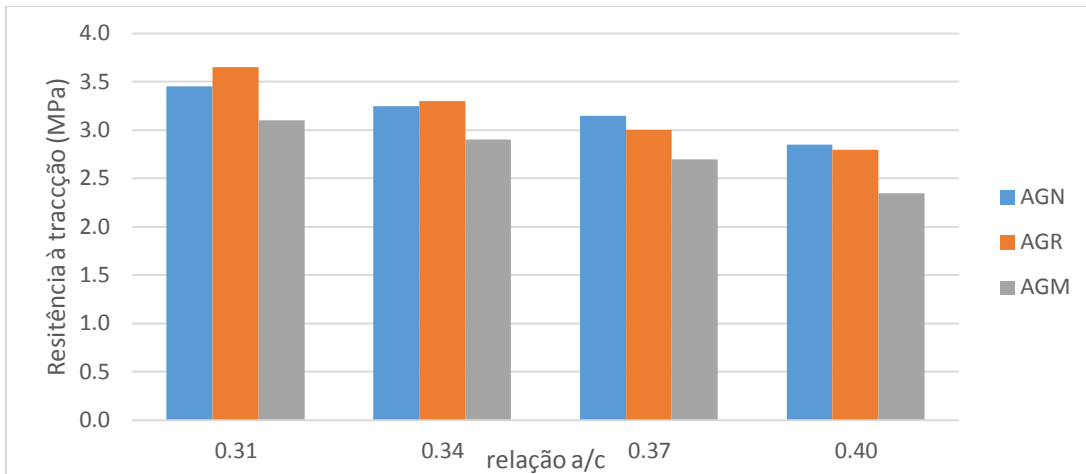


Figura 80 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014)

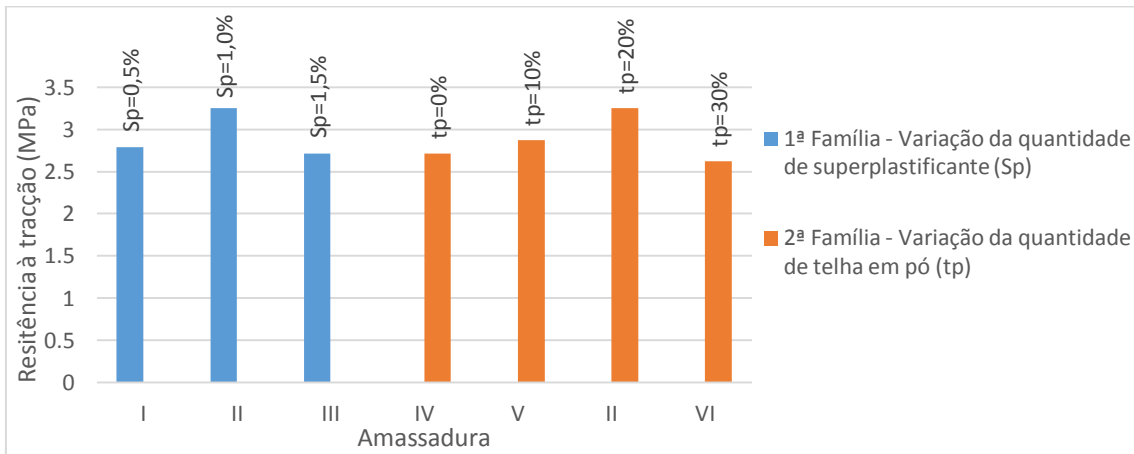


Figura 81 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (Herbudiman e Saptaji, 2013)

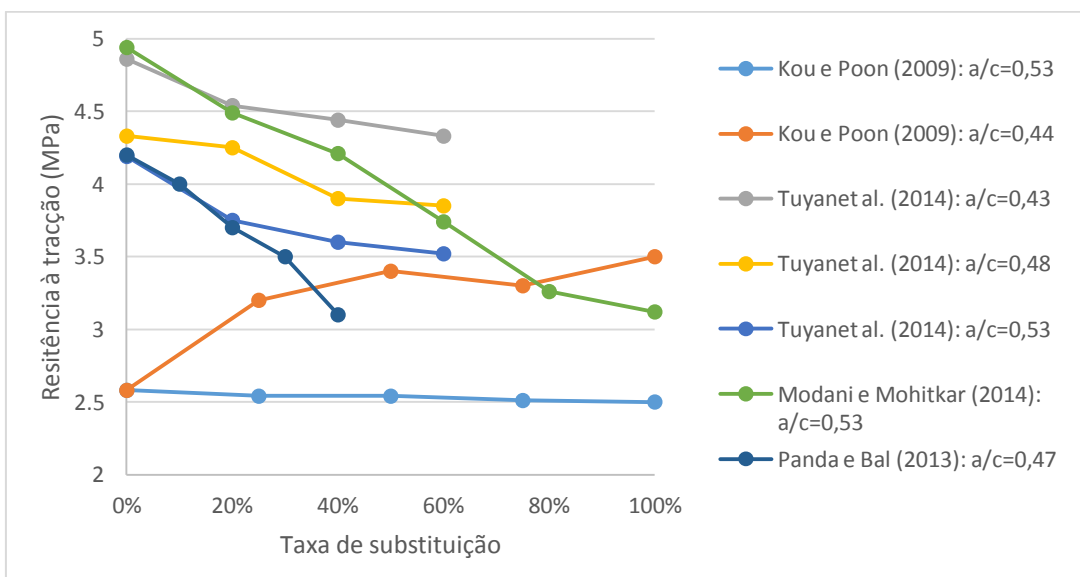
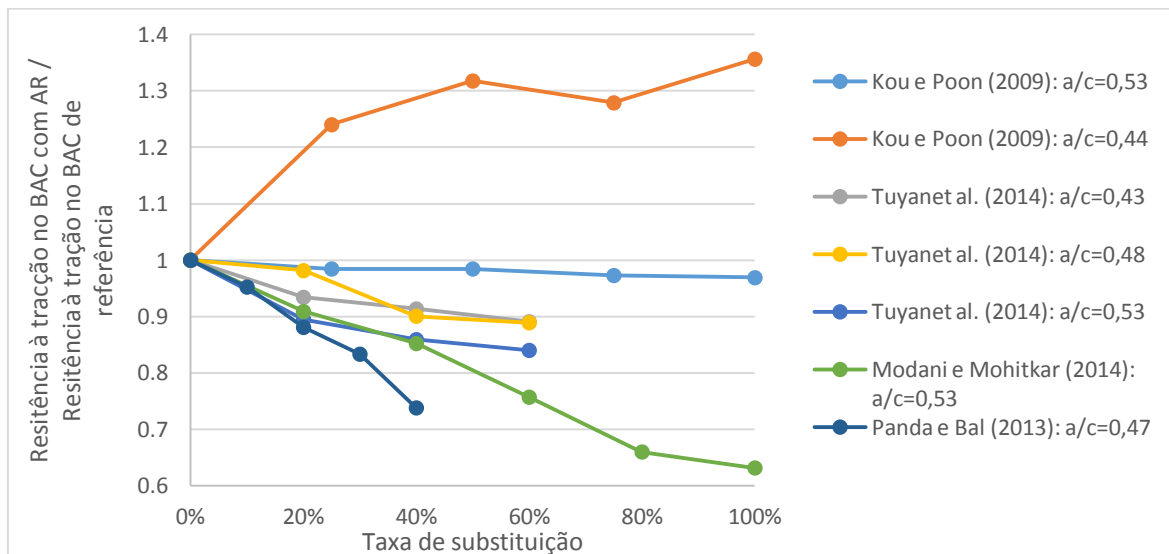


Figura 82 - Comparação dos resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias



**Figura 83 - Comparação dos resultados de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias (quociente entre a resistência à tracção no BAC de referência e a resistência à tracção no BAC com AR)**

Em todos os estudos em análise, verifica-se que a resistência à compressão por tracção diametral diminui com a percentagem de substituição de AR (como esperado). No entanto, na campanha de Kou e Poon (2009), verifica-se a tendência oposta (para a relação a/c de 0,44). Tal é justificado pela existência de cinzas volantes (que reagem com o óxido de cálcio proveniente dos AR) e pela menor relação a/c.

### 2.2.2.5. Resistência à tracção por flexão

Relativamente à tracção por flexão, verifica-se também uma diminuição nesta propriedade com a substituição de AN por AR. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: desenvolvimento da resistência ao longo do tempo; relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção por flexão conduzida por Grdic et al. (2010) são apresentados na Figura 84.

Tal como na resistência à compressão, a resistência à tracção por flexão diminui com a percentagem de substituição. Tal é devido à deficiente ligação entre a argamassa aderida contida nos AGR e os próprios AGN originais. Verifica-se que a variação da resistência à tracção por flexão ao longo do tempo é pouco acentuada (2,49 e 13,95% para 50 e 100% de AGR respectivamente).

Panda e Bal (2013), no seu estudo, avaliaram a resistência à tracção por flexão a diferentes idades (7, 28 e 90 dias). Na Figura 85, são apresentados os resultados.

Analisando a figura, o que se verifica é uma redução pouco acentuada à medida que a taxa de substituição aumenta. Esta tendência acentua-se com a idade, o que se poderá dever ao facto de, numa fase inicial, o cimento não hidratado contido nos agregados

recicladados ser activado, sendo que com o tempo esse efeito se irá reduzindo. Verifica-se, tal como na resistência à tracção por flexão avaliada pelos autores, que aos 28 dias o betão atinge aproximadamente a mesma resistência do que aos 90 dias (em média 97%), o que indicia cimentos de endurecimento rápido.

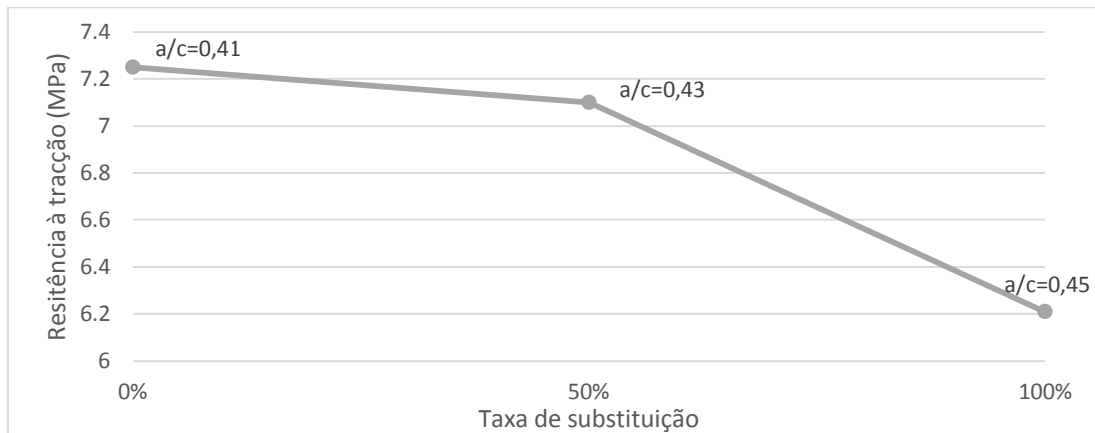


Figura 84 - Resistência à tracção por flexão aos 28 dias (Grdic et al., 2010)

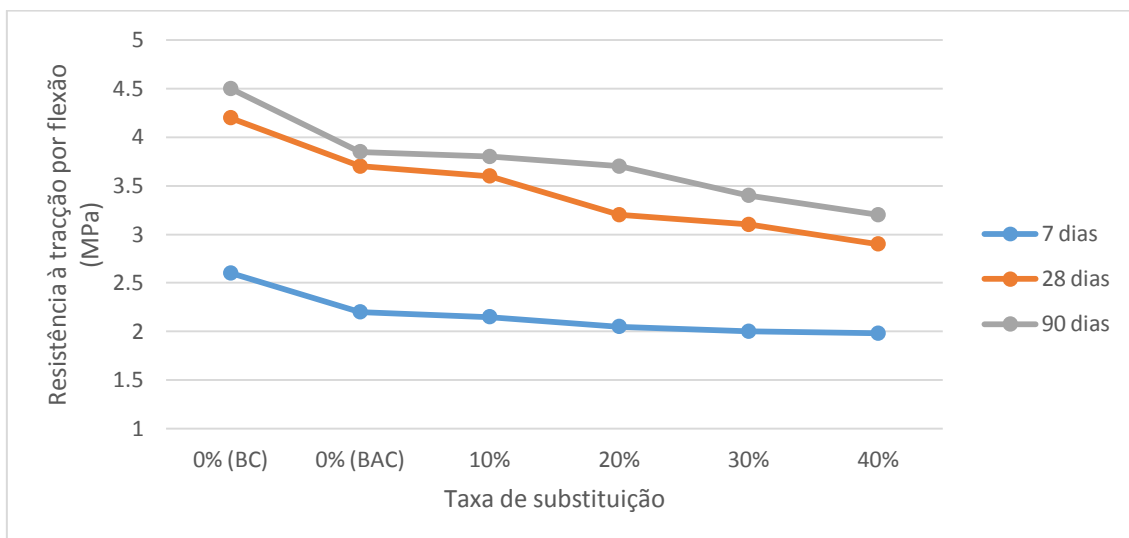
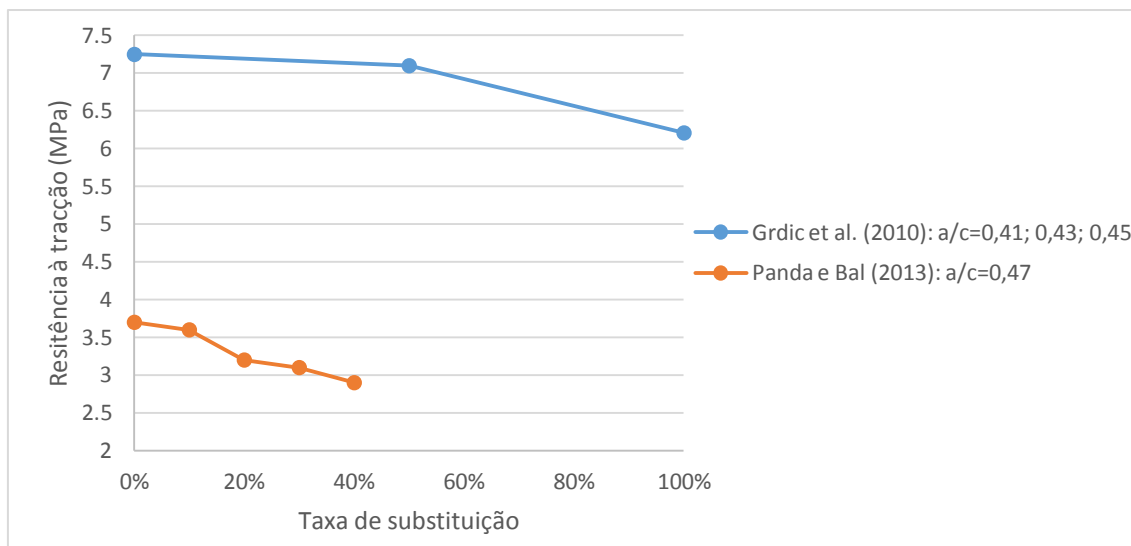


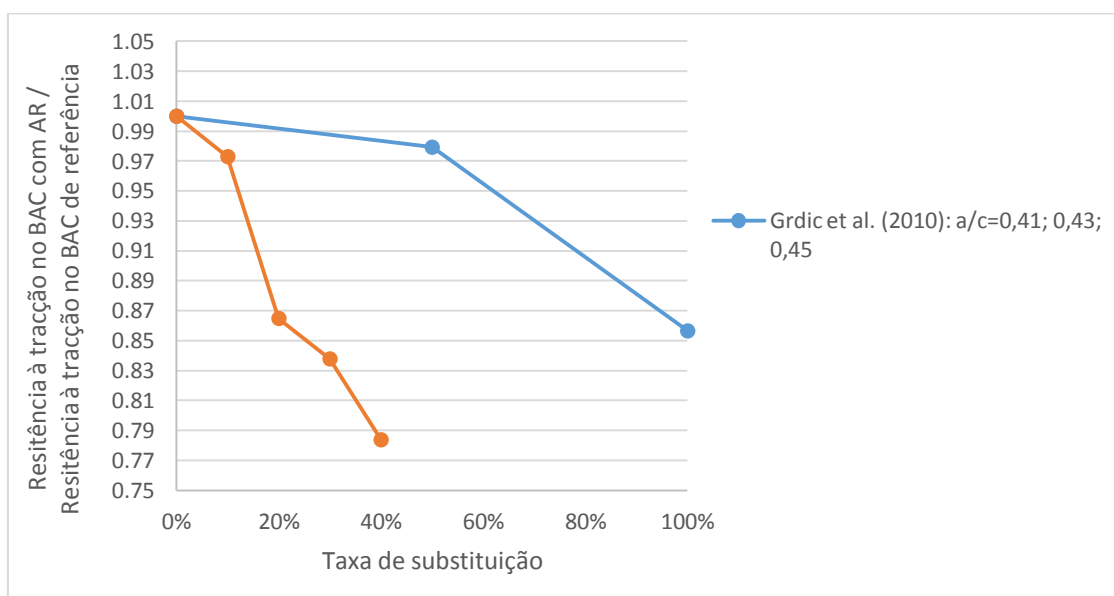
Figura 85 - Resistência à tracção por flexão aos 7, 28 e 90 dias (Panda e Bal, 2013)

Na Figura 86 e na Figura 87, é apresentado o resumo dos resultados da resistência à tracção por flexão aos 28 dias obtidos por diferentes autores (para diferentes taxas de substituição de AR).

Em todos os estudos, verifica-se que a resistência à compressão por tracção diminui com a percentagem de substituição de AR (como expectável). Também se verifica que a resistência à tracção diminui com o aumento da relação a/c.



**Figura 86 - Comparação dos resultados de resistência à tração por flexão aos 28 dias**



**Figura 87 - Comparação dos resultados de resistência à tração por flexão aos 28 dias (quociente entre a resistência à tração no BAC de referência e a resistência à tração no BAC com AR)**

### 2.2.2.6. 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 AN por AR. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: idade do betão, influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Na campanha de Pereira-de-Oliveira et al. (2014), verifica-se que a incorporação de AGR reduz o módulo de elasticidade como se pode observar na Figura 88 (à excepção do resultado anómalo para a taxa de substituição de 40% aos 7 dias). A diminuição é de cerca de

3% para 40% de substituição (aos 7 e 28 dias de idade) e de 5% para 100% de substituição (aos 28 dias de idade). A redução verificada é influenciada pela densidade do BAC em estado endurecido, uma vez que a determinação do módulo de elasticidade depende da densidade. Os autores verificaram que o módulo de elasticidade aumenta com a idade, como previsto. A redução do módulo de elasticidade é explicada pela menor rigidez dos AGR (em comparação com os AGN) dada a presença de argamassa antiga aderida aos agregados e também a menor deformabilidade da referida pasta de cimento.

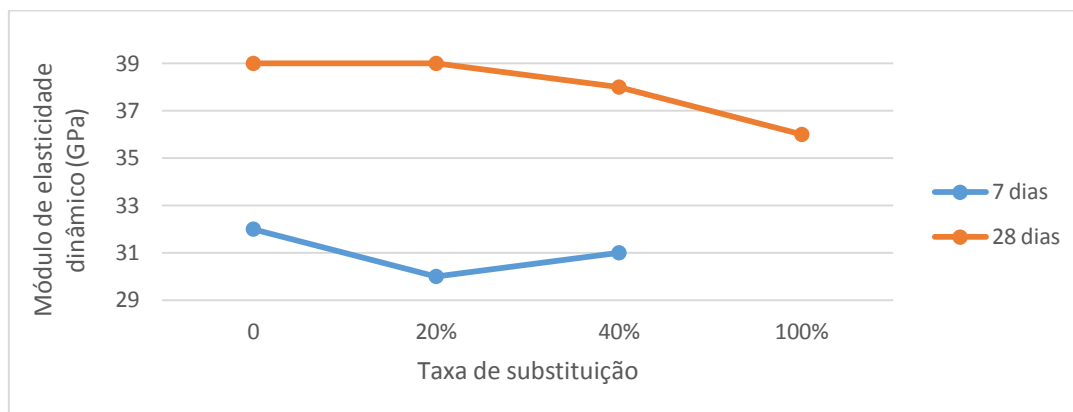


Figura 88 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 7 e 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)

Na campanha de Uygunoğlu et al. (2014), verifica-se que os BAC com AGM têm menor módulo de elasticidade do que os AGN e AGR. Tal é justificado pela forma mais alongada do agregado e pela ligação mais fraca entre a matriz de cimento e os AGM. Observando a Figura 89, verifica-se que ocorre uma redução do módulo de elasticidade com a relação a/c.

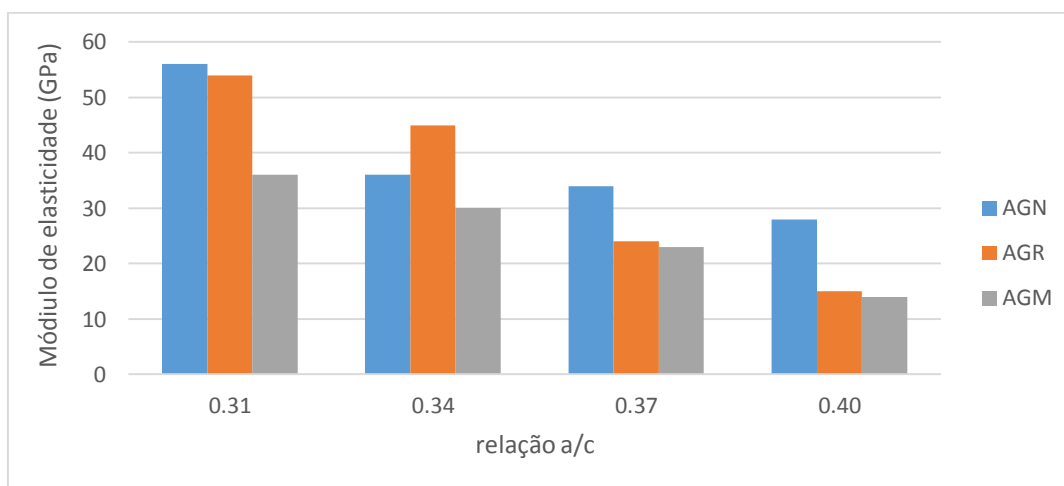


Figura 89 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias (Uygunoğlu et al., 2014)

### 2.2.2.7. Permeabilidade ao oxigénio

Pereira-de-Oliveira et al. (2014) não conseguiram obter valores de permeabilidade ao oxigénio (mesmo submetendo o provete até à pressão de 3,5 bar). Por conseguinte, os



autores referem que que o BAC relativamente a esta propriedade é considerado hermético. Este facto é também confirmado com o ensaio de absorção de água sob pressão (realizado aos mesmos provetes após o ensaio de permeabilidade ao oxigénio). Os autores obtiveram valores de permeabilidade à água sob pressão relativamente baixos: variando de  $2,5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  a  $6 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ .

### 2.2.2.8. Absorção de água por capilaridade

No que respeita à absorção de água por capilaridade, segundo a literatura consultada, existe uma diminuição no desempenho desta propriedade devido à introdução de AR no betão. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Tuyan et al. (2014) verificaram que a absorção de água por capilaridade aumenta com o teor de AGR (Figura 90). É possível observar, para a taxa de incorporação de 100% de AGR, um aumento de cerca de 1% (para todas as famílias). Tal é explicado pela maior capacidade de absorção de água dos AGR em comparação com os AN. Também ocorre um aumento da absorção de água por capilaridade com a relação a/c (como expectável).

Também Modani e Mohitkar (2014) verificaram que a absorção de água aumenta com a incorporação de AGR (Figura 91). O aumento verificado é de cerca de 41% para 100% de substituição. Tal é justificado pela maior absorção de água por parte dos AGN (como é possível verificar na Tabela 20).

Por outro lado, Pereira-de-Oliveira et al. (2014) verificaram que a incorporação de AGR não afecta significativamente a absorção de água por capilaridade, dada a proximidade das curvas obtidas (Figura 92). Os autores verificaram que a absorção de água por capilaridade diminuía com a substituição de AGN por AGR. Esta diminuição foi de cerca de 12% para 100% de substituição. Tal é justificado pelo elevado volume de pasta de cimento que constitui o BAC. Esta pasta envolve os AGR e entra na sua estrutura porosa.

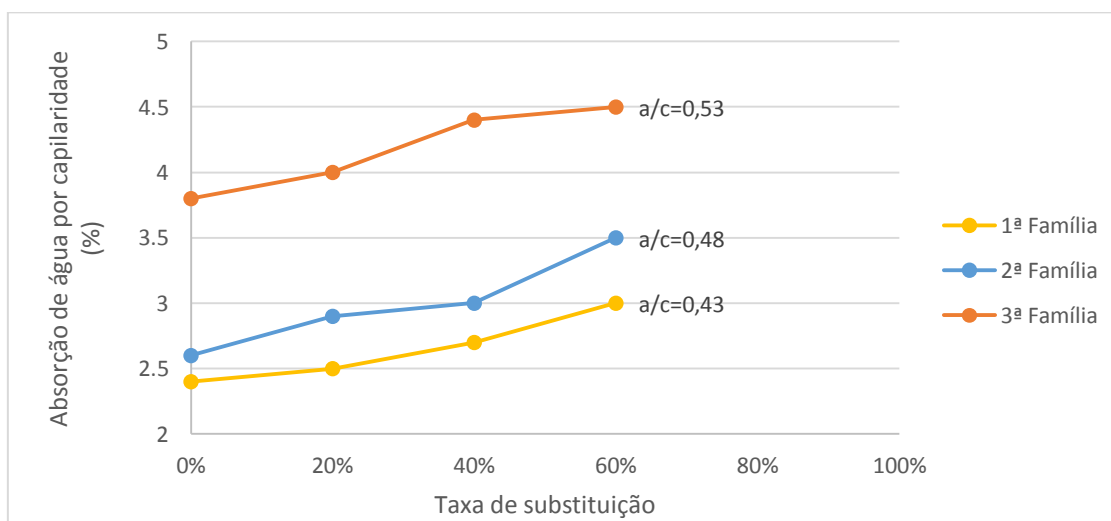


Figura 90 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (Tuyan et al. 2014)

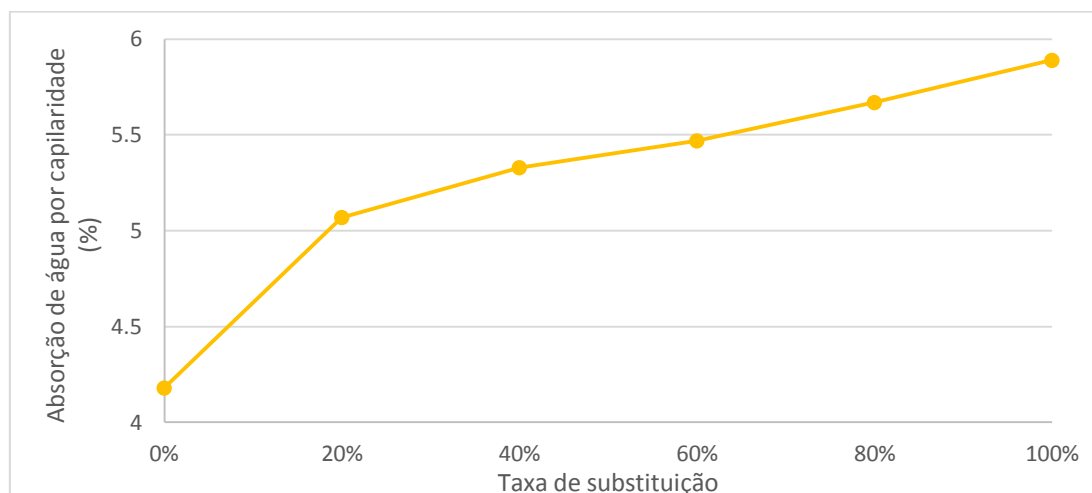


Figura 91 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (Modani e Mohitkar, 2014)

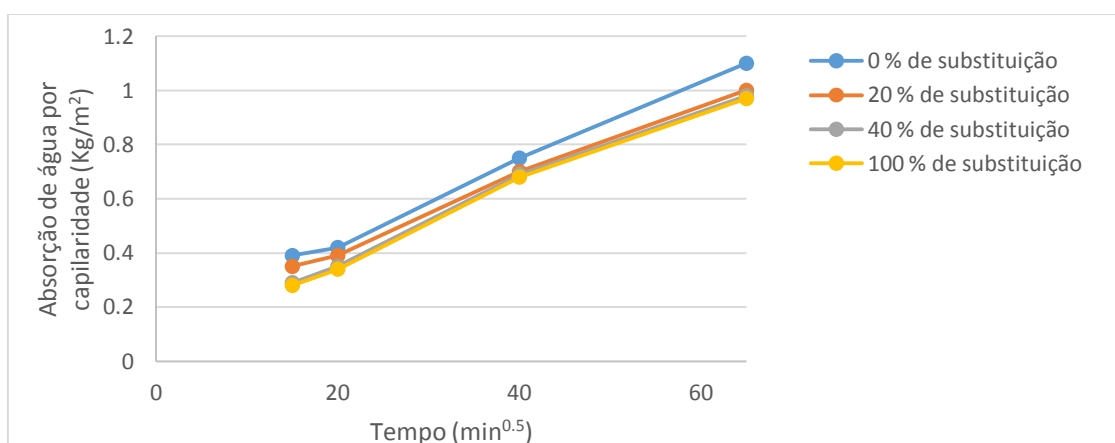


Figura 92 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (Pereira-de-Oliveira et al., 2014)

### 2.2.2.9. Absorção de água por imersão

De modo idêntico à propriedade anterior, também a absorção de água por imersão regista um pior desempenho quando são utilizados agregados AR. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Grdic et al. (2010), ao analisarem a absorção de água por imersão (Figura 93), verificaram que esta aumenta com a taxa de substituição de AGR. O aumento verificado é de cerca de 67% para 100% de substituição. Esta tendência é atribuída à maior absorção do agregado reciclado relativamente ao agregado natural (5,88% para AR e 0,94% para AN, no caso da fracção 4/8 mm) e também pelo aumento gradual da relação a/c.

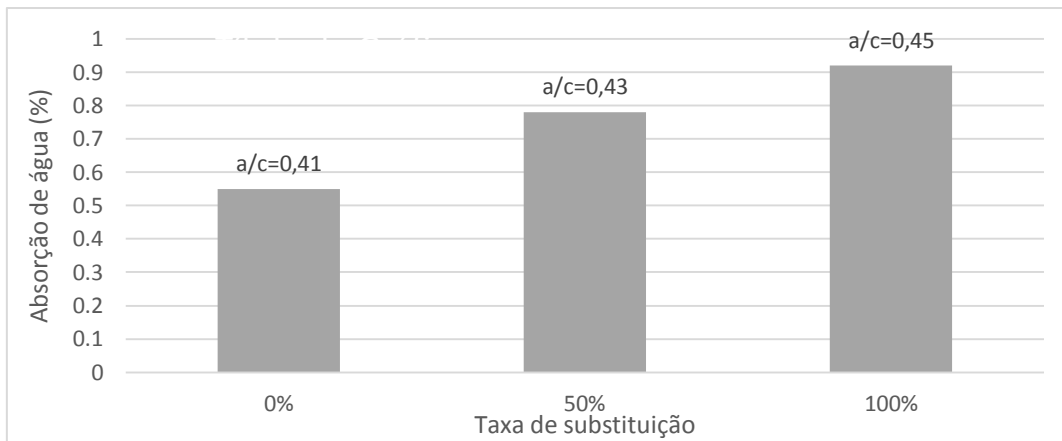


Figura 93 - Absorção de água por imersão aos 28 dias (Grdic et al., 2010)

### 2.2.2.10. 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 análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Na campanha de Kou e Poon (2009), a resistência aos iões cloreto foi analisada através da determinação da carga passada durante 6 horas em provetes. Os resultados são apresentados na Figura 94.

A resistência à penetração de iões cloreto aumentou com o teor de AFR, o que é explicado pelos autores pelo maior efeito de enchimento dos poros causado pelos AFR, uma vez que possuem maior percentagem de partículas pequenas em relação à areia de rio. A redução da carga passada foi de 29% (1ª família) e 49% (2ª família) para 100% de substituição de AFR por areia.

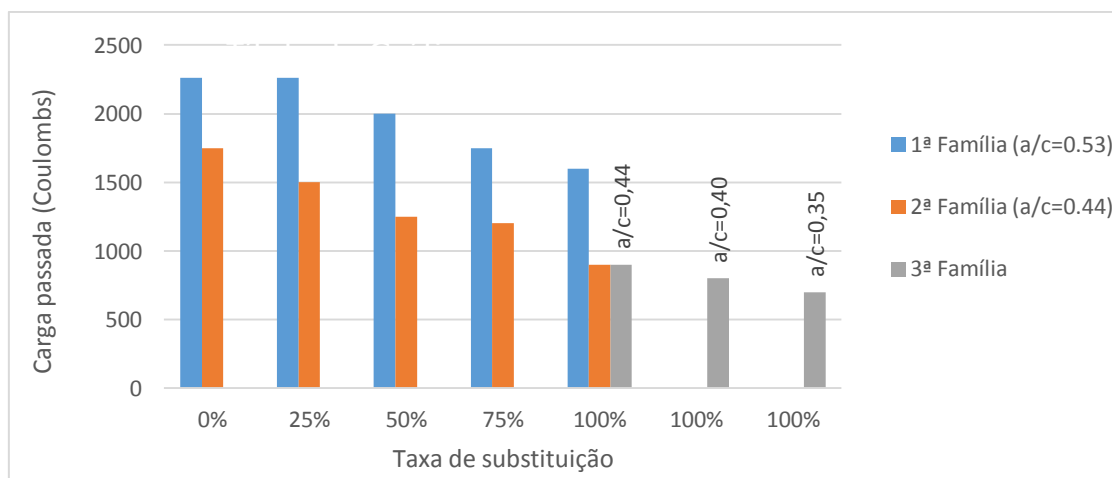


Figura 94 - Carga passada aos 28 dias (Kou e Poon, 2009).

Verifica-se que o BAC da 1ª família tem menor resistência à penetração de iões cloreto,

em relação às restantes famílias, uma vez que apenas a 2ª e a 3ª família incorporam cinzas volantes do tipo II (f-RA). A presença destas cinzas volantes faz com que ocorra um aumento da dimensão média dos poros nas idades mais jovens; no entanto, para idades mais avançadas, existe uma tendência de diminuição do volume dos poros, fazendo diminuir a possibilidade de penetração dos agentes agressivos (RILEM, 1991).

Na campanha de Tuyan et al. (2014), a resistência aos iões cloreto foi analisada através da determinação da carga passada durante 6 horas em provetes. Os resultados são apresentados na Figura 95.

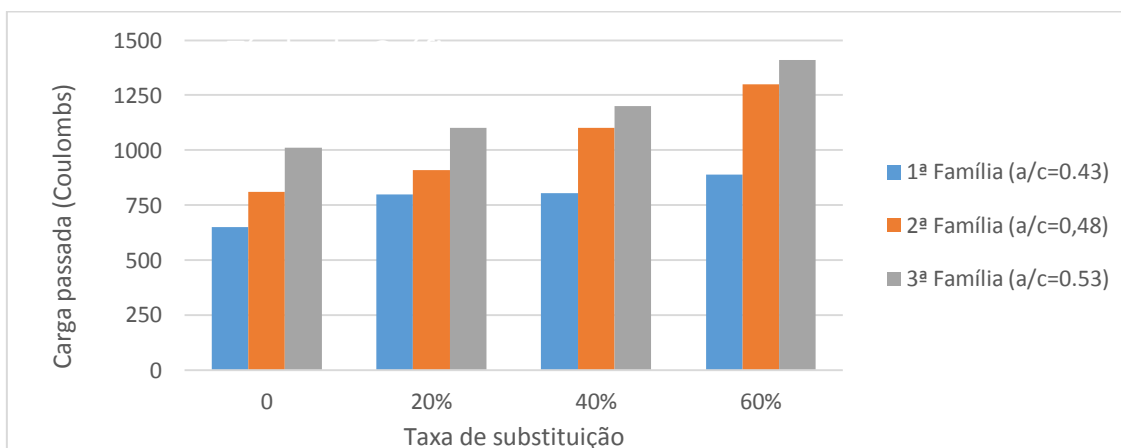


Figura 95 - Carga passada aos 28 dias (Tuyan et al. 2014)

A resistência à penetração de iões cloreto diminuiu com o teor de AGR, ou seja, a penetração de iões cloreto aumentou com a percentagem de AGR. Tal é justificado pela maior porosidade dos AGR em comparação com os AGN. O aumento da carga passada foi de 37% (1ª família), 60% (2ª família) e de 38% (3ª família) para 60% de substituição de AFR por areia. Também se verifica que a penetração de iões cloreto aumentou com a relação a/c, tal como Kou e Poon (2009) verificaram.

Modani e Mohitkar (2014) também verificaram que a penetração de cloretos aumenta com a incorporação de AGR (Figura 96). O aumento verificado é de cerca de 2% para 100% de substituição. Tal é justificado pela maior porosidade AGR em comparação com os AGN (devido à argamassa que faz parte dos AGR).

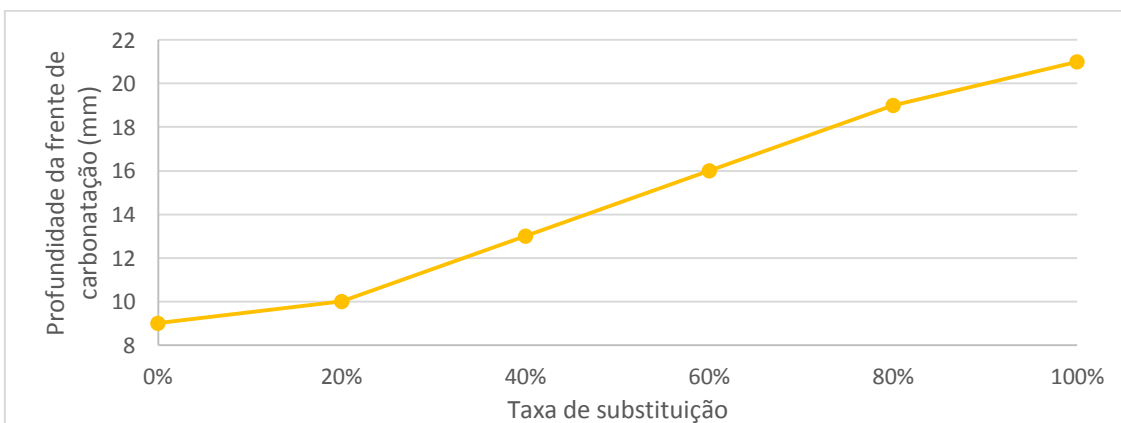


Figura 96 - Profundidade da frente de carbonatação aos 28 dias (Modani e Mohitkar, 2014)

### 2.2.2.11. Retracção

A incorporação de AR no betão provoca uma redução da retracção. Na análise desta propriedade, são considerados os seguintes aspectos: desenvolvimento da retracção ao longo do tempo; relação a/c das misturas; influência dos agregados e taxa máxima de substituição.

Na campanha de Kou e Poon (2009), a retracção foi avaliada em provetes prismáticos. Os resultados são apresentados da Figura 97 à Figura 99.

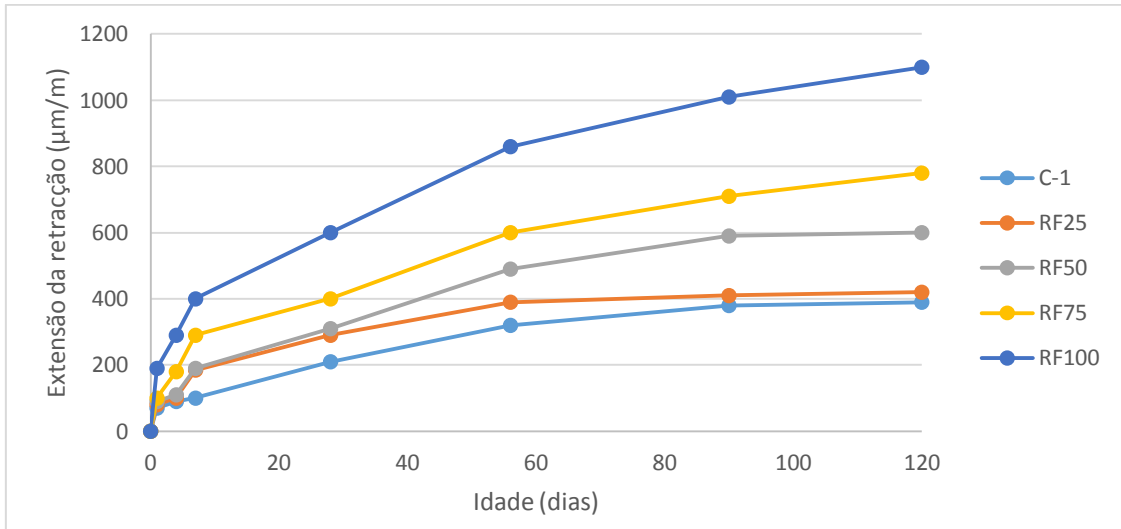


Figura 97 - Extensão total da retracção ao longo do tempo para as misturas da 1ª família (Kou e Poon, 2009)

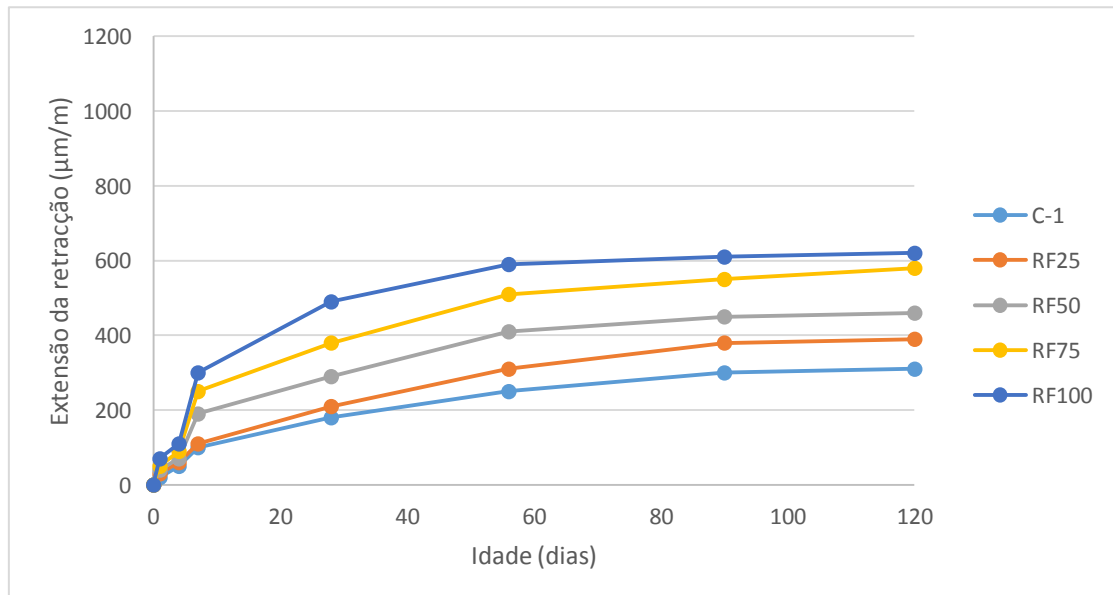


Figura 98 - Extensão total da retracção ao longo do tempo para as misturas da 2ª família (Kou e Poon, 2009)

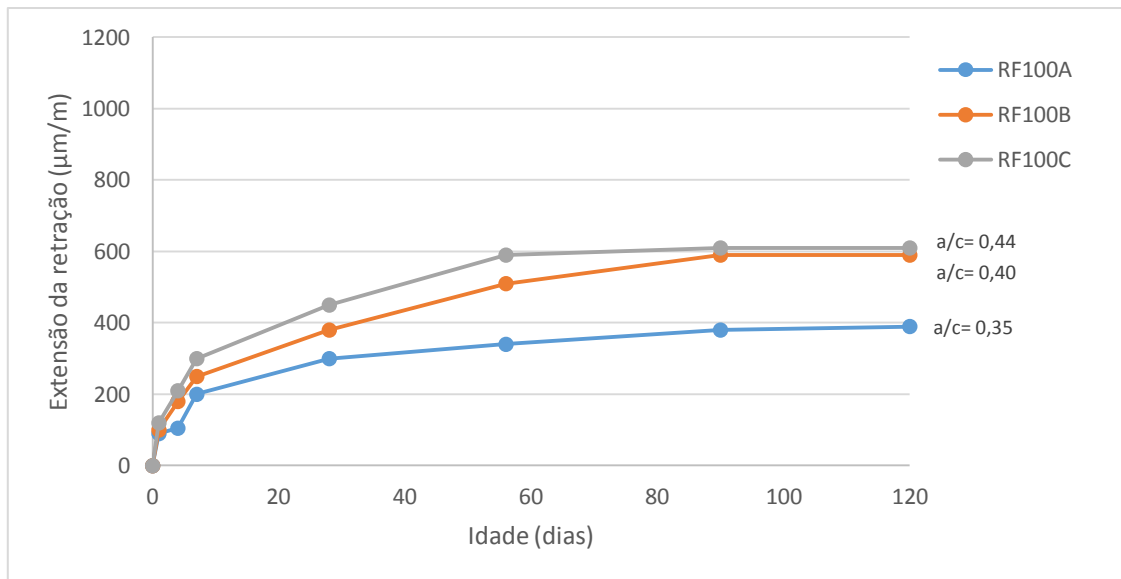


Figura 99 - Extensão total da retração ao longo do tempo para as misturas da 3ª família (Kou e Poon, 2009)

Estes autores verificaram que a retração aumentou com o tempo (como seria expectável) e com a taxa de substituição de AFR, como se pode observar por comparação entre a Figura 97 e a Figura 98 ou na Figura 99. O aumento da retração foi de 182% (1ª família) e de 100% (2ª família) para 100% de substituição de AFR. Tal é explicado pela maior porosidade dos AFR e conseqüente menor massa volúmica (devida à pasta endurecida aderida aos AFR) que diminuem a sua rigidez e a capacidade de restringir a deformação.

Pode-se ainda constatar que o aumento da retração provocado pela incorporação de AFR pode ser controlado até certo ponto reduzindo a relação a/c (Figura 99).

### 3. Considerações finais

Através do estado da arte realizado, conclui-se que a presença de argamassa nos agregados reciclados é uma das principais razões para perdas de qualidade, em relação aos agregados naturais. Por conseguinte, os AR possuem menor densidade, maior absorção de água e menor resistência mecânica do que os AN. As referidas propriedades são as que mais influenciam nas propriedades do BAC em que é usado este tipo de agregados.

É muito importante avaliar as propriedades do BAC em estado fresco, uma vez que este tem de ter características específicas para que possa ser considerado como auto-compactável, isto é, tem de possuir a capacidade de escoar e compactar apenas sob acção do seu próprio peso, encher a cofragem com as suas armaduras, tubos, negativos, etc., conservando a homogeneidade, não sendo necessário qualquer meio de vibração para ser colocado em obra.

Na Tabela 34, é apresentada uma síntese das investigações desenvolvidas acerca da influência da incorporação de agregados reciclados (para a taxa de substituição de 100%) nas propriedades do BAC em estado fresco.

**Tabela 34 - Influência dos AGR e AFR no desempenho de BAC (estado fresco) em diferentes investigações**

Propriedades		Tipo de substituição		Estudos
		AGR	AGR+AFR	
Fluidez e velocidade do escoamento na ausência de obstruções	Diâmetro de espalhamento	(-) 6,7 % (S=5,0)	-	AGR - Grdic et al. (2010); Safiuddin et al. (2011); Modani e Mohitkar (2014).
		(+) 3,8 %	(+) 4,7 % (S=0,2)	AGR - Pereira-de-Oliveira et al. (2014). AGR+AFR - Kou e Poon (2009).
	Tempo de espalhamento	(+) 25,0 % (S=19,1)	-	AGR - Grdic et al. (2010); Safiuddin et al. (2011); Modani e Mohitkar (2014).
Viscosidade e capacidade de enchimento	Tempo de escoamento no funil V	(+) 62,10 % (S=80,43)	-	AGR - Safiuddin et al. (2011); Pereira-de-Oliveira et al. (2014); Modani e Mohitkar (2014).
Capacidade de escoamento através de espaços confinados	Índice de capacidade de passagem na caixa L	(+) 7,6 % (S=2,9)	(+) 8,7 % (S=1,0)	AGR - Grdic et al. (2010). AGR+AFR - Kou e Poon (2009).
Resistência à segregação	Índice de segregação	(-) 24,9 % (S=27,1)	-	AGR - Grdic et al. (2010); Safiuddin et al. (2011).
		-	(+) 24,7 %	AGR+AFR - Kou e Poon (2009).
Capacidade de passagem através de espaços estreitos	Diâmetro de espalhamento	(-) 12,9 %	-	AGR - Safiuddin et al. (2011).

A fluidez do BAC é avaliada através do diâmetro de espalhamento. Nas investigações consultadas, verifica-se que este diminui com a percentagem de substituição de AGR, dado que, para maiores percentagens de substituição, foi absorvida mais água pelos agregados (Grdic et al., 2010 e Pereira-de-Oliveira et al., 2014). Safiuddin et al. (2011), Tuyan et al. (2014) e Modani e Mohitkar (2014) verificaram que o diâmetro de espalhamento aumenta com a percentagem de substituição de AGR (até 20 a 60%), devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas (a partir de 50 a 100%), o diâmetro de espalhamento diminui devido à maior quantidade de AGR.

A viscosidade do BAC é avaliada através do tempo de escoamento no funil V. Verifica-se que este aumenta com a percentagem de substituição de AGR devido à sua superfície mais rugosa em comparação com os AGN. Safiuddin et al. (2011), Modani e Mohitkar (2014) verificaram que o tempo de escoamento no funil diminuía com a percentagem de substituição de AGR (até 20 a 40%) devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas, o tempo de escoamento no funil aumentou devido à maior quantidade de AGR e à sua maior rugosidade e angulosidade.

A capacidade de escoamento do BAC através de espaços confinados é avaliada pelo índice de capacidade de passagem na caixa L (PL). Verifica-se que os valores de PL aumentam com a percentagem de substituição de AR. Tal é justificado pela menor absorção de água dos AFR nos primeiros instantes da amassadura (Kou e Poon, 2009), pela maior relação a/c (Grdic et al. 2010) e pelo aumento de superplastificante (Tuyan et al., 2014).

Na resistência à segregação do BAC, avaliada através do índice de segregação (SR), ocorrem três tendências distintas. Kou e Poon (2009) verificaram que o valor de SR aumenta com a percentagem de substituição de AFR devido à sua reduzida absorção de água nos instantes iniciais da amassadura. Por outro lado, Grdic et al. (2010) verifica-

ram que o valor de SR diminui com a percentagem de substituição de AGR devido ao seu gradual aumento de absorção de água. Por fim, Safiuddin et al. (2011) verificaram que o valor de SR aumenta com baixas percentagens de substituição de AN por AR (30 e 40%), devido à reduzida quantidade de AGR, e que, para percentagens de substituição mais elevadas (70 e 100%), o valor de SR diminui devido à maior quantidade de AFR provenientes da quebra dos AGR durante o processo de mistura.

A capacidade de passagem do BAC através de espaços confinados é avaliada pelo diâmetro de espalhamento no anel J. Verifica-se que o diâmetro de espalhamento aumenta com a percentagem de substituição de AGR (30% e 40%), devido à reduzida quantidade de AGR. Para percentagens de substituição mais elevadas (70% e 100%), o diâmetro de espalhamento diminui devido à maior quantidade de AGR. Para maiores percentagens de substituição, ocorreu um aumento de finos gerados pela quebra de AGR durante o processo de amassadura, pelo que foi absorvida mais água pelos AR. Tal fez com que o espalhamento diminuísse.

A massa volúmica do BAC diminui cerca de 3% para a taxa de substituição de 100% de AGR, aos 28 dias de idade (Pereira-de-Oliveira et al., 2014).

A velocidade de propagação de ultra-sons no interior do BAC diminui cerca de 6% para 60% de substituição de AGR (Tuyan et, et al. 2014).

A redução verificada nas duas propriedades referidas (massa volúmica e a velocidade de propagação de ultra-sons) é justificada pela menor densidade dos AR em comparação com os AN.

Através dos valores obtidos em vários trabalhos, na Tabela 35, efectuou-se uma síntese da influência da incorporação de agregados reciclados (para a taxa de substituição de 100%) nas propriedades mecânicas do BAC.

**Tabela 35 - Influência dos AGR e AFR no desempenho de BAC (estado endurecido) em diferentes investigações (propriedades mecânicas avaliadas aos 28 dias de idade do BAC).**

Propriedades	Tipo de substituição		Estudos
	AGR	AGR+AFR	
Resistência à compressão	(-) 10,0 % (S=5,3)	(-) 22,3% (S=6,0)	AGR - Grdic et al. (2010); Pereira-de-Oliveira et al. (2014); Modani e Mohitkar (2014) AGR+AFR - Corinaldesi et al. (2004); Kou e Poon (2009)
Resistência à tracção por compressão diametral	(-) 22,5 % (S=20,5)	(-) 3,10%	AGR - Modani e Mohitkar (2014); Güneyisi et al. (2014) AGR+AFR - Kou e Poon (2009)
Resistência à tracção por flexão	(-) 14,3 %	-	AGR - Grdic et al. (2010)

Como se pode verificar na Tabela 35, a resistência à compressão e à flexão, na maioria dos estudos consultados, diminui com a percentagem de substituição de AR devido à menor resistência mecânica dos AR em comparação com os AN.

A incorporação de AGR reduz o módulo de elasticidade (Pereira-de-Oliveira et al., 2014). A diminuição é de cerca de 5% para 100% de substituição. Tal é justificado pela menor rigidez dos AGR (em comparação com os AGN), dada a presença de argamassa antiga aderida aos agregados e a menor deformabilidade da referida pasta de cimento.



Na Tabela 36, é apresentada uma síntese das investigações desenvolvidas acerca da influência da incorporação de agregados reciclados (para a taxa de substituição de 100%) nas propriedades do BAC.

**Tabela 36 - Influência dos AGR e AFR no desempenho de BAC (estado endurecido) em diferentes investigações (propriedades de durabilidade avaliadas aos 28 dias de idade do BAC).**

Propriedades	Tipo de substituição		Estudos
	AGR	AGR+AFR	
Absorção de água por capilaridade	(+) 40,9 %	-	AGR - Modani e Mohitkar (2014)
	(-) 12 %	-	AGR - Pereira-de-Oliveira et al. (2014)
Absorção de água por imersão	(+) 67,3%	-	Grdic et al. (2010)
Resistência à penetração de cloretos	-	(+) 39,0 % (S=14,1)	AGR+AFR - Kou e Poon (2009)
	(-) 2,3 %	-	AGR - Modani e Mohitkar (2014)
Retração	-	(+) 141,0% (S=58,0)	AGR+AFR - Kou e Poon (2009)

A absorção de água por capilaridade aumenta com a incorporação de AGR (Tuyan, et al. (2014), Modani e Mohitkar (2014)) assim como a absorção de água por imersão (Grdic et al., 2010). Tal é justificado pela maior absorção de água por parte dos AGN.

Por outro lado, Pereira-de-Oliveira et al. (2014) verificaram que a absorção de água por capilaridade diminuía com a substituição de AGN por AGR. Tal é justificado pelo elevado volume de pasta de cimento que constitui o BAC, sendo que esta envolve os AGR e entra na sua estrutura porosa.

A penetração de iões cloreto diminui com o teor de AFR, o que é explicado pelo maior efeito de enchimento dos poros causado pelos AFR, uma vez que possuem maior percentagem de partículas pequenas em relação à areia de rio (Kou e Poon, 2009). Por outro lado, a penetração de iões cloreto aumentou com a incorporação de AGR (Tuyan, et al., (2014), Modani e Mohitkar (2014)). Tal é justificado pela maior porosidade AGR em comparação com os AGN (devido à argamassa que faz parte dos AR).

A retração aumenta com a taxa de substituição de AFR (Kou e Poon, 2009). Tal é explicado pela maior porosidade dos AFR e conseqüente menor massa volúmica (devida à pasta endurecida aderida aos AFR) que diminuem a sua rigidez e a capacidade de restringir a deformação.

## 4. Bibliografia

**APEB** (Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto) - Betão autocompactável: guia para a especificação, produção e utilização, Lisboa, Portugal, APEB, 2007, 91 p.

**Corinaldesi, V., Moriconi, G.,** - Self-compacting concrete: A great opportunity for recycling materials, *in* International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, 2004, 10 p.

**Corinaldesi, V; Orlandi, G; Moriconi, G** - Self-compacting concrete incorporating recycled aggregate, 2002, pp. 455-464

**EFNARC** (European Federation of National Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products for Concrete) - Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, Surrey, UK, ISBN: 0-9539733-4-4, 2002, 12 p.

**Grdic, Z. J.; Toplicic-Curcic, G. a.; Despotovic, I. M.; Ristic, N. S.** - Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*. Vol. 24, 2010, pp. 1129–1133.

**Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Algin, Z., Yazıcı, H** - Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 64, 2014, pp. 172–183.

**Herbudiman, B., Saptaji, A. M.** - Self-compacting concrete with recycled traditional roof tile powder, *Procedia Engineering*, Vol. 54, 2013, pp. 805–816.

**Modani, P. O., Mohitkar, V. M.** - Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainable development, Vol. 4, N° 3, 2014, pp. 430–440.

**Nepomuceno M. C. S.** - Metodologia para a composição de betões autocompactáveis. Covilhã, Portugal, Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Civil, 2005, 733 p., Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.

**NP EN 206-9** - Betão, Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC), Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 35 p.

**NP EN 12350-8** - ensaios do betão no estado fresco, Parte 8: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

**NP EN 12350-9** - ensaios do betão no estado fresco, Parte 9: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento no funil V, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 11 p.

**NP EN 12350-10** - ensaios do betão no estado fresco, Parte 10: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento na caixa L, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

**NP EN 12350-11** - ensaios do betão no estado fresco, Parte 11: Betão autocompactável, Ensaio de segregação no peneiro, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

**NP EN 12350-12** - ensaios do betão no estado fresco, Parte 12: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento no anel J, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 14 p.

**Panda, K. C.; Bal, P. K.** - Properties of self-compacting concrete using recycled coarse aggregate, *Procedia Engineering*, Vol. 51. 2013, pp. 159–164.

**Pereira-de-Oliveira, L. a.; Nepomuceno, M. C. S.; Castro-Gomes, J. P.; Vila, M. F. C.** - Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 51, 2014, pp. 113–120.

**Rilem report 7** - Fly ash in concrete, properties and performance, Report of technical committee 67-FAB use of fly ash in building, Wesche K. (eds.), RILEM Publications, ISBN: 0-203-62641-9, 1991, 284 p.

**Safiuddin, M.; Salam, M. a.; Jumaat, M. Z.** - Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 11, N° 4, 2011, pp. 1023–1041.

**Tuyan, M.; Mardani-Aghabaglou, A.; Ramyar, K.** - Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate, Materials & Design, Vol. 53, 2014, pp. 983–991.

**Uygunoğlu, T., Topçu, İ. B., & Çelik, A. G.** - Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability, Journal of Cleaner Production, Vol.84, 2014, pp. 691–700.

**Kebaïli, O., Mouret, M., Arabi, N., & Cassagnabere, F.** - Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example, Journal of Cleaner Production, Vol.87, 2015, pp.752–761.

**Kou, S. C.; Poon, C. S.** - Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, Vol. 31, 2009, pp. 622–627.

Lisboa, 24 de Março de 2015

Autores

Tiago Barroqueiro  
Bolseiro de Investigação

Sara Santos  
Aluna de Mestrado

Jorge de Brito  
Professor Catedrático

Pedro Silva  
Professor Adjunto