

Influência de Superplastificantes em Betões com Agregados Finos Reciclados de Betão

Influence of Superplasticizers on Concrete with Recycled Fine Concrete Aggregates

Pedro Pereira *, Luís Evangelista ** e Jorge de Brito ***

SUMÁRIO

O reaproveitamento de elementos de betões estruturais como novos agregados para betão surge como uma hipótese favorável à sustentabilidade das reservas naturais. Embora os agregados grossos reciclados de betão sejam já reconhecidos como alternativa viável, os finos reciclados de betão são comumente classificados como recursos menos nobres. Foi desenvolvido um trabalho de investigação, com o propósito de valorizar estes agregados através do uso de superplastificantes em betões.

Neste artigo, apresentam-se os resultados principais e o tratamento estatístico da informação recolhida durante essa mesma campanha.

ABSTRACT

The reuse of structural concrete elements as aggregates for new concrete emerges as a favorable solution to the sustainability of natural resources. Even though recycled concrete coarse aggregates are now recognized as a viable alternative, the fine recycled concrete resources are commonly classified as a poor solution. A research program was developed with the purpose of providing a useful purpose to these aggregates through the use of superplasticizers in concrete.

In this paper the main results and statistical analysis of the data collected during that campaign are presented.

1 - INTRODUÇÃO

A reutilização de agregados reciclados (AR) constitui um avanço importante no sentido do desenvolvimento de uma sociedade mais sustentável. O seu uso em betão surge como uma alternativa ao seu depósito em aterro e favorável à sustentabilidade das reservas de agregados naturais.

As primeiras investigações focavam sobretudo o processamento de resíduos de betão, a sua granulometria, características mecânicas e aspectos de durabilidade. Recentemente têm vindo também a ser analisados os desempenhos mecânicos e aspectos económicos referentes ao uso de betões com agregados reciclados (BAR). Os resultados iniciais sobre o comportamento mecânico de BAR foram revistos nos trabalhos de Nixon (1978), Hansen (1992) e Brito (2005). Nenhuma das revisões sugere o uso de AR em betões estruturais como inadequado.

Khatib (2004) verificou reduções sistemáticas até 30% na resistência à compressão a longo prazo para taxas de incorporação de AFRB até 100%.

Solyman (2005) constatou que a natureza e a qualidade dos agregados finos reciclados (AFR) incorporados influenciam a resistência do betão, onde os agregados finos reciclados de betão (AFRB) produzidos em laboratório surgem como os com melhor desempenho, em contraste com os AFR provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) não tratados. O autor refere que a eliminação do material ligante aderido e a correcção da angulosidade das partículas poderia melhorar significativamente a qualidade dos agregados reciclados. No entanto, conclui que é possível substituir agregados finos naturais (AFN) por diferentes AFR em betões com classe de resistência até C35/45 sem que daí provenham problemas de resistência.

Através da sua campanha experimental, Evangelista (2007), concluiu que a resistência à compressão não é afectada em betões com AFRB (BAFRB) com taxas de incorporação até 30%. Para a mesma taxa de substituição, verificou um ligeiro decréscimo na resistência à compressão e módulo de elasticidade embora ambas as propriedades apresentassem valores aceitáveis. A resistência à abrasão aparentou aumentar com a incorporação de AFRB.

As características dos AR, a composição do betão e o tipo de superplastificante utilizado em muito influenciam o desempenho mecânico de BAR. Embora existam diversos estudos sobre a influência dos dois primeiros, pouco se sabe sobre a interacção entre superplastificantes e AR.

Os superplastificantes são responsáveis por diversos efeitos no betão, como o aumento da tensão de rotura, a possibilidade de diminuição da dosagem de cimento mantendo a resistência e a trabalhabilidade, o aumento da trabalhabilidade para as mesmas dosagens de água e cimento e a diminuição da permeabilidade (Coutinho, 1988). Neste sentido, o mecanismo de dispersão dos superplastificantes de última geração, baseados em ésteres policarboxílicos, é particularmente eficaz devido a dois géneros de forças repulsivas entre as partículas de cimento. Estas são as repulsões electrostáticas devido à presença da carga negativa originada pelo grupo carboxílico e o efeito de repulsão estérica, própria das longas cadeias poliméricas, às partículas de cimento. O efeito duplo permite reduções até 40% da água de amassadura (Collepari, 1998; Frommenwiler, 2000).

Foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre campanhas experimentais com AFRB. A informação recolhida resume as propriedades mais relevantes dos AR, os resultados experimentais e as conclusões de cada campanha. De um modo geral, as investigações consultadas apontam para um decréscimo do desempenho mecânico dos betões com agregados finos reciclados de betão (BAFRB), tanto maior quanto maior a taxa de substituição de agregados primários / naturais (AN) por AR, quando comparado com um betão

* Eng.º Civil, Mestre em Construção IST;

** Assistente ISEL;

*** Professor Catedrático IST.

de referência (BR) (betão produzido apenas com AN).

Posteriormente foi planeada e executada a campanha experimental. Os AFRB e AN (finos e grossos) foram analisados mas os seus resultados não são pormenorizados neste documento. Foram produzidos betões sem adjuvante (SA), com superplastificante corrente (SP 1) e com superplastificante de alto desempenho (SP 2) e, para cada tipo de adjuvante, cinco amassaduras diferentes. De modo a manter uma base comparativa coerente entre as diferentes misturas, foram realizados ensaios aos betões no estado fresco, mantendo a trabalhabilidade / abaixamento.

Após o período de cura, foram ensaiados aos betões no estado endurecido e os resultados experimentais analisados em pormenor. Como resultado final desta investigação, foram estabelecidas correlações entre as propriedades dos AFRB, as propriedades dos AR, as taxas de substituição de AN por AR e o adjuvante utilizado.

2 - CAMPANHA EXPERIMENTAL

Foram usados os seguintes materiais para fazer os betões:

- **agregados finos reciclados de betão (AFRB):** os AR foram produzidos no laboratório, através de britagem em trituradora de maxilas de um betão original produzido por uma empresa de betão pronto e vertido nos moldes no laboratório;
- **agregados naturais (AN):** os agregados naturais (de origem calcária) foram fornecidos pela mesma empresa de betão pronto, de modo a serem idênticos aos utilizados no betão de origem;
- **cimento:** foi utilizado um cimento CEM II/A-L 42,5 R portland, tal como no betão de origem;

- **água:** a água de amassadura proveio da rede pública.

Foram produzidas cinco amassaduras distintas por tipo de adjuvante utilizado: um betão corrente de referência (BR) e quatro BAR com taxas de substituição de AFN por AFRB de 10, 30, 50 e 100%. Todas as composições têm a mesma curva granulométrica real dos agregados e a mesma dosagem de cimento. Quando utilizados, os superplastificantes foram doseados em 1% da massa de cimento. De modo a manter os abaixamentos dentro do intervalo especificado de 120 ± 10 mm para todos os betões, foi aumentada a relação água / cimento para a compensação da absorção de água dos AFRB e diminuída através do efeito dos superplastificantes. A redução da quantidade de água na amassadura implica o aumento da quantidade de agregados, aumentando a quantidade de AFRB presentes nas misturas com superplastificantes.

A composição do betão de referência sem adjuvante (BR0) é apresentada no Quadro 1 e foi considerada com as seguintes características:

- **classe de resistência:** C25/30;
- **classe de consistência:** S2;
- **ligante:** CEM II/A-L 42,5 R portland;
- **máxima dimensão dos agregados:** $D_{max} = 31,5$ mm;
- **adjuvantes:** nenhum.

Aos betões fabricados com o superplastificante corrente, com base numa mistura de polímeros orgânicos e aditivos (Sika, 2012), corresponde o betão de referência 1 (BR1) e aos betões produzidos com o superplastificante de alto desempenho, com base numa combinação de policarboxilatos modificados em solução aquosa (Sika, 2011), corresponde o betão de referência (BR2). O Quadro 1 apresenta as proporções dos constituintes desses betões.

Quadro 1 - Composição dos betões de referência (BR0, BR1 e BR2)

		BR0		BR1		BR2	
		(m ³ /m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /m ³)	(kg/m ³)
Cimento		0,115	350,0	0,115	350,0	0,115	350,0
Grossos	22,4 - 31,5	0,034	90,6	0,036	96,0	0,037	98,6
	16,0 - 22,4	0,141	375,9	0,146	389,2	0,151	402,5
	11,2 - 16,0	0,121	322,5	0,125	333,2	0,130	346,5
	8,0 - 11,2	0,051	135,9	0,053	141,3	0,054	143,9
	5,6 - 8,0	0,041	109,3	0,043	114,6	0,044	117,3
	4,0 - 5,6	0,008	21,3	0,009	24,0	0,009	24,0
Finos	2,0 - 4,0	0,041	106,8	0,042	109,4	0,043	112,0
	1,0 - 2,0	0,080	208,4	0,083	216,3	0,085	221,5
	0,5 - 1,0	0,089	231,9	0,093	242,3	0,096	250,1
	0,250 - 0,5	0,058	151,1	0,061	158,9	0,063	164,1
	0,125 - 0,25	0,018	46,9	0,019	49,5	0,019	49,5
	0,063 - 0,125	0,002	5,2	0,002	5,2	0,002	5,2
	0 - 0,063	0,003	7,8	0,003	7,8	0,003	7,8
Água		0,185	185,0	0,158	158,0	0,133	133,0
Vazios		0,013	0,0	0,013	0,0	0,013	0,0
Superplastificante		0,000	0,0	0,003	3,5	0,003	3,5
		1,000		1,000		1,000	
Relação a/c efectiva		0,55		0,45		0,38	

As análises granulométricas foram feitas segundo as normas NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999). A determinação da massa volúmica e absorção de água seguiu a metodologia da norma NP EN 1097-6 (2003), a determinação da massa volúmica aparente seguiu a norma NP EN 1097-3 (2003) e o teor de humidade das partículas foi obtido através da norma NP EN 1097-5 (2002). O índice de forma das partículas foi obtido segundo a norma NP EN 933-4 (2002) e o ensaio de Los Angeles executado segundo a especificação LNEC E-237 (1970). A evolução da absorção de água dos AFRB foi determinada através do procedimento proposto por Leite (2001).

O betão fresco foi produzido com recurso a uma betoneira automática. Imediatamente após a mistura, foram medidos o seu abaixamento e a sua massa volúmica. O abaixamento foi avaliado segundo o ensaio de abaixamento de Abrams, descrito na norma NP EN 12350-2 (2002). A massa volúmica do betão no estado fresco foi determinada de acordo com a norma NP EN 12350-6 (2002).

A resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias foi avaliada com base na norma NP EN 12390-3 (2003). A resistência à tracção por compressão diametral foi determinada pela norma NP EN 12390-6 (2003). O módulo de elasticidade foi obtido pela especificação LNEC E-397 (1993) e a

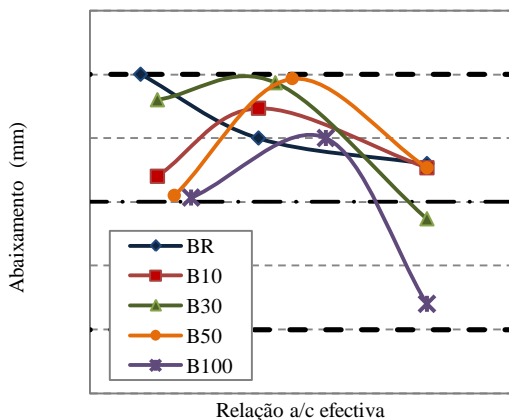


Figura 1 - Relação entre abaixamento e relação a/c efectiva

4 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, a resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias por tipo de adjuvante e por BAFRB. A resistência de cada BAFRB relativa ao seu BR é apresentada na Figura 6. Em todos os betões, verificaram-se ganhos de resistência tanto maiores quanto maior o poder reductor de água dos adjuvantes.

resistência à abrasão pela norma alemã DIN 52108 (2007).

3 - TRABALHABILIDADE

A Figura 1 apresenta os resultados do ensaio de abaixamento do cone de Abrams para todas as taxas de substituição de AFN por AFRB. A Figura 2 apresenta as relações efectivas água / cimento entre os betões com adjuvantes e os betões sem adjuvante. Dela resulta a variação do poder reductor de água dos superplastificantes em função da taxa de substituição de AFN por AFRB.

As relações estabelecidas nesta figura revelam, através de excelentes correlações, um comportamento linear entre a diminuição da eficácia dos superplastificantes com o aumento da taxa de AFRB incorporada. Os resultados indicam que o SP 1 é mais sensível à presença de AFRB do que o SP 2. Já que os superplastificantes de base polimérica actuam sobre a superfície dos agregados reciclados, por estes conterem produtos hidratados de cimento (Collepari, 1998), a redução do seu desempenho deve-se ao aumento da superfície específica dos agregados, através da substituição de AFN por AFRB, para a mesma dosagem de superplastificante.

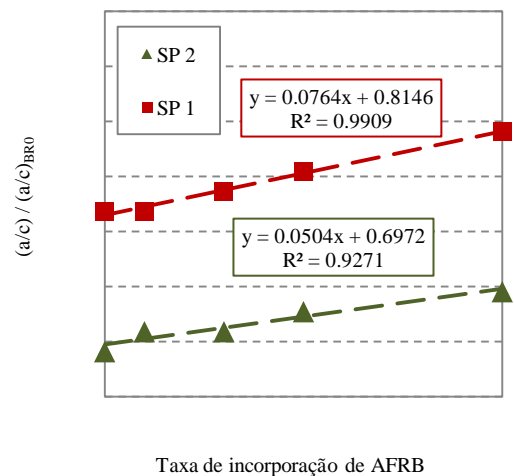
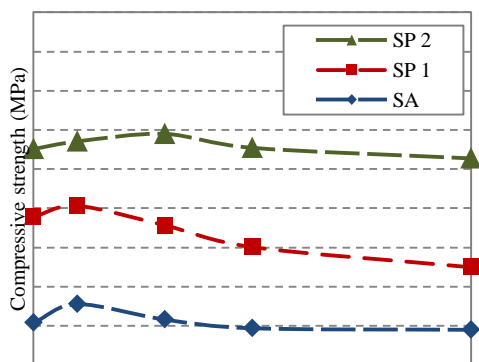


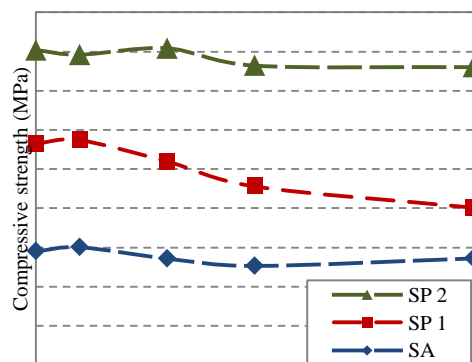
Figura 2 - Variação do poder reductor dos superplastificantes com a taxa de incorporação de AFRB

Os betões de referência tiveram resistências à compressão médias (f_{cm}) de 39,5, 53,3 e 65,5 MPa, respectivamente para os betões sem superplastificante, com SP 1 e com SP 2. Aos 7 dias, os betões sem adjuvante possuíam cerca de 79% da resistência registada aos 28 dias, enquanto que, para os betões com superplastificantes, este valor atinge 83%. Betões com incorporação de 10% de AFRB revelaram, em geral, resistências superiores aos BR.



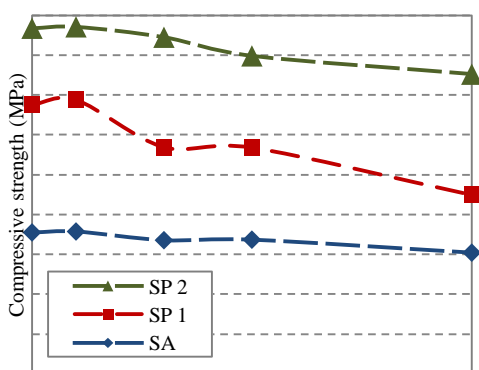
Taxa de incorporação de AFRB

Figura 3 - Influência da incorporação de AFRB na resistência à compressão aos 7 dias



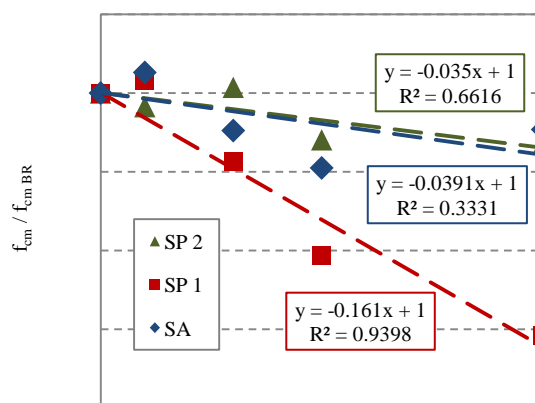
Taxa de incorporação de AFRB

Figura 4 - Influência da incorporação de AFRB na resistência à compressão aos 28 dias



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 5 - Influência da incorporação de AFRB na resistência à compressão aos 56 dias



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 6 - Resistência à compressão relativa dos BAFRB aos 28 dias

Quadro 2 - Densidade dos betões no estado fresco

	BR			B10R			B30R			B50R			B100R		
	D (kg/m³)	↳ _{AFR} (%)	↳ _{SP} (%)	D (kg/m³)	↳ _{AFR} (%)	↳ _S P (%)	D (kg/m³)	↳ _{AFR} (%)	↳ _S P (%)	D (kg/m³)	↳ _{AFR} (%)	↳ _S P (%)	D (kg/m³)	↳ _{AFR} (%)	↳ _S P (%)
SA	2395	0	0	2378	-0,7	0	2363	-1,3	0	2349	-1,9	0	2309	-3,6	0
SP1	2452	0	2,4	2430	-0,9	2,2	2406	-1,9	1,8	2390	-2,5	1,7	2370	-3,3	2,7
SP2	2476	0	3,4	2454	-0,9	3,2	2446	-1,2	3,5	2430	-1,9	3,4	2418	-2,3	4,7

Nos betões com SP 1, as reduções foram maiores, verificando-se uma relação linear muito boa entre o aumento da taxa de substituição de AFN por AFRB e o decréscimo da resistência relativa. Este efeito está relacionado com a maior variação da relação água / cimento registada com a introdução de AFRB em betões com SP 1. A resistência à compressão, para os betões sem adjuvante e os betões com SP 2, apesar de ter diminuído com a incorporação de AFRB, manteve-se dentro dos mesmos patamares de valores. Os betões sem adjuvante tiveram a menor redução da resistência relativa com a introdução de AR na mistura, o que poderá ser justificado pelo facto de a relação água / cimento efectiva se ter mantido constante. Os betões com SP 2 verificaram uma variação da resistência relativa muito próxima da dos betões sem adjuvante.

Conclui-se que, para esses betões, o aumento da relação água / cimento efectiva devida à incorporação de AFRB é compensada pela maior compactidade da mistura. Esta compactidade pode ser facilmente comprovada através da determinação da densidade em estado fresco, que se apresenta no Quadro 2. Adicionalmente, no mesmo quadro, são apresentadas as variações relativas da densidade, em termos percentuais, quando se incorpora AFR nas amassaduras (↳_{AFR}) e a influência da incorporação de plastificantes numa mesma família de betões, com a mesma taxa de substituição de AFN por AFR (↳_{SP}). Neste, é visível que a densidade diminui com a incorporação de AFR, e aumenta com a capacidade de redução de água dos plastificantes utilizados.

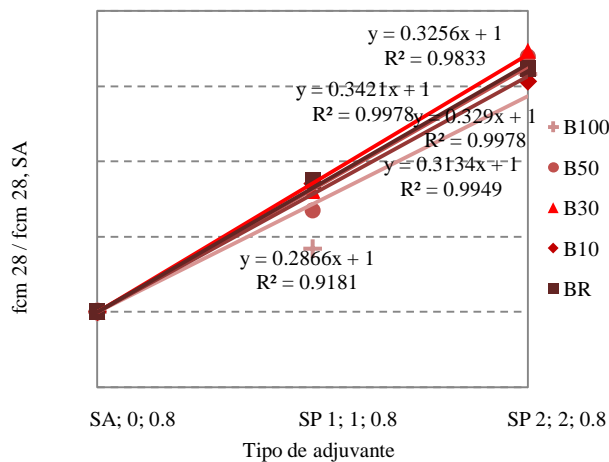
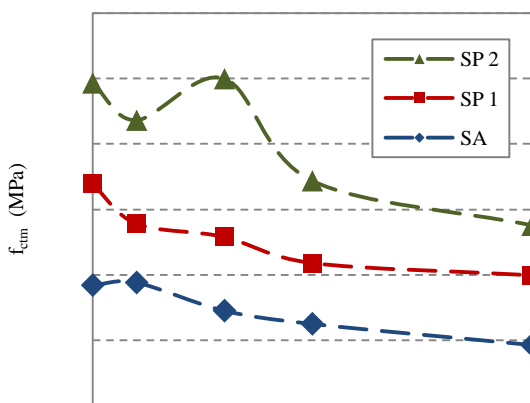


Figura 7 - Influência dos superplastificantes na resistência à compressão de BAFRB

Os resultados sugerem que o desempenho dos adjuvantes foi tanto melhor quanto menor a taxa de incorporação de AFRB e menor a idade do betão. Tal é comprovado pela análise (Figura 7), sobre a influência relativa dos superplastificantes na resistência à compressão dos BR e dos BAFRB. Estes efeitos poderão ser justificados pelo aumento da superfície específica dos AFR na mistura para a mesma quantidade de adjuvante, uma vez que os reciclados são mais alongados e angulosos do que os naturais. Não se verificou influência dos plastificantes no comportamento das curvas de tensão / extensão (Figura 8), salvo no valor de tensão de cedência, embora a influência dos adjuvantes seja particularmente notada, quer na tensão de cedência, quer no patamar de cedência.



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 9 - Influência da incorporação de AFRB na resistência à tracção por compressão diametral

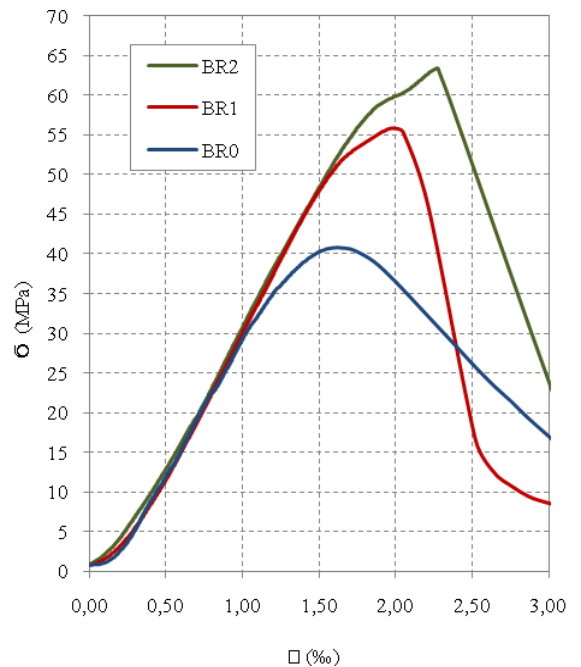
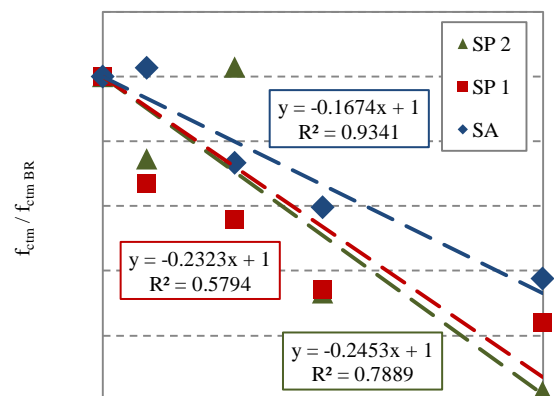


Figura 8 - Curvas tensão (∇) / deformação (⇨) dos BR

4 - RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados para a resistência à tracção por compressão diametral, em função da taxa de AFRB, são apresentados na Figura 9. As variações relativas aos respectivos BR acham-se na Figura 10. A utilização de superplastificantes permitiu aumentos consideráveis da resistência à tracção, mesmo nos betões com maiores taxas de AFRB. Os betões de referência tiveram resistências à tracção por compressão diametral (f_{cm}) de 2,9, 3,7 e 4,5 MPa para betões sem adjuvante, com SP 1 e com SP 2, respectivamente.



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 10 - Resistência à tracção por compressão diametral relativa dos BAFRB aos 28 dias

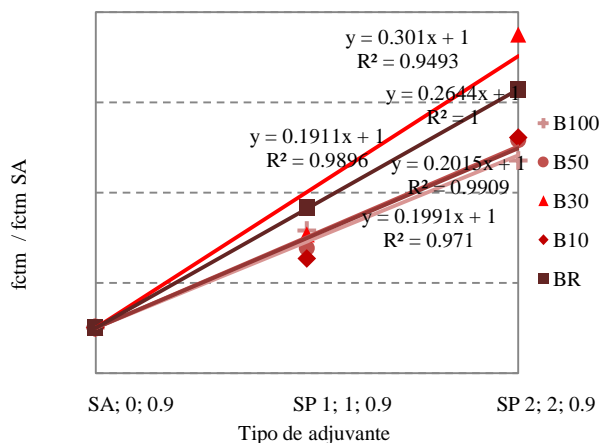
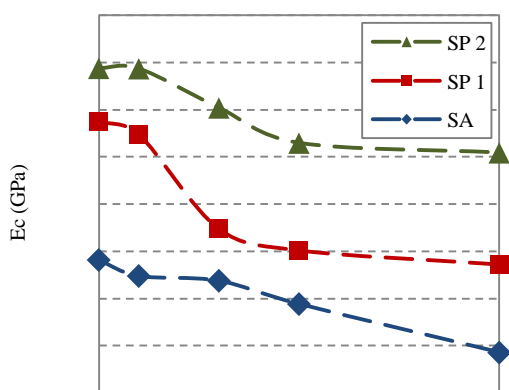


Figura 11 - Influência dos superplastificantes na resistência à tracção por compressão diametral de BAFRB

A resistência à tracção por compressão diametral diminuiu com a substituição de AFN por AFRB. Betões com taxas de AFRB até 50% feitos com superplastificantes tiveram resistências à tracção por compressão diametral maiores do que os betões de referência fabricados sem adjuvante ou com superplastificante de menor desempenho.

As relações lineares estabelecidas para a resistência à tracção relativa nos betões sem adjuvante revelaram uma correlação muito boa entre essa característica e a incorporação de AFRB. Já os BAFRB produzidos com plastificantes, apesar de registarem maiores valores absolutos, foram, em termos relativos, mais sensíveis à incorporação dos AR, ainda que estes valores não tenham atingido correlações conclusivas. O pior desempenho relativo dos BAFRB com superplastificantes estará relacionado com o aumento da relação água / cimento face aos betões sem adjuvante.

A análise da influência dos superplastificantes na resistência à tracção por compressão diametral (Figura 11) comprova a maior influência dos adjuvantes nos BR do que nos BAFRB. A perda da eficácia dos superplastificantes por aumento da superfície específica dos agregados na mis-



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 12 - Influência da incorporação de AFRB no módulo de elasticidade

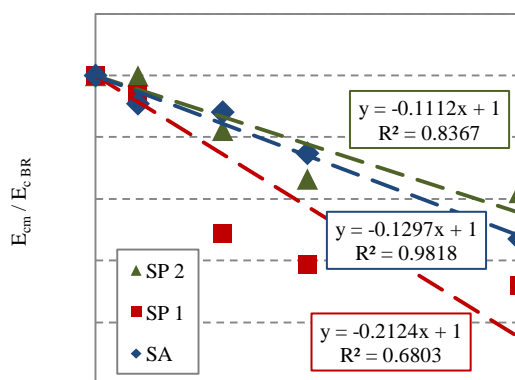
tura, seja pelo aumento da taxa de incorporação de AFRB, seja pela redução da relação água / cimento e subsequente aumento da quantidade de agregados na composição, parece ser a causa deste efeito. Os resultados obtidos nos BAFRB sem adjuvante vão ao encontro do verificado em outras investigações, registrando uma correlação bastante boa entre a resistência à tracção relativa ao respectivo BR e a taxa de substituição de AFN por AFRB.

5 - MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados do ensaio do módulo de elasticidade aos 28 dias são apresentados na Figura 12. A Figura 13 apresenta os módulos de elasticidade relativos aos respectivos betões de referência.

O uso de superplastificantes aumentou os valores do módulo de elasticidade, mesmo para BAFRB. Os betões de referência registaram módulos de elasticidade (E_c) de 37,0, 44,4 e 47,2 GPa, respectivamente para os betões sem superplastificante, com SP 1 e com SP 2.

A substituição de AFN por AFRB resultou em decréscimos do módulo de elasticidade. Nos betões com adjuvantes, houve maiores decréscimos do módulo de elasticidade para taxas de incorporação de AFRB iguais ou superiores a 30%. Os BAFRB com SP 1 registaram os piores desempenhos relativos, embora a relação linear estabelecida não possua uma boa correlação. Os betões sem adjuvante ou com SP2 tiveram um desempenho relativo semelhante, com boas correlações estabelecidas e superior ao verificado para os BAFRB com SP1. Mais uma vez, a maior compatibilidade da mistura, possibilitada pela aplicação do SP 2, será a responsável pelo alto desempenho mecânico. A análise da influência de superplastificantes sobre o módulo de elasticidade dos BR e dos BAFRB, representada pela Figura 14, não permitiu retirar conclusões, embora as variações constatadas fossem pequenas.



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 13 - Módulo de elasticidade relativo dos BAFRB aos 28 dias

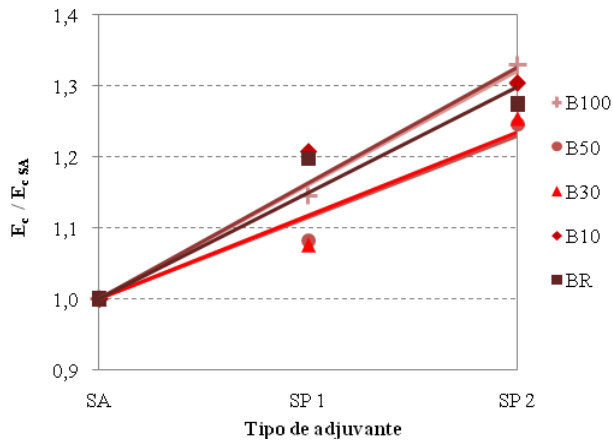
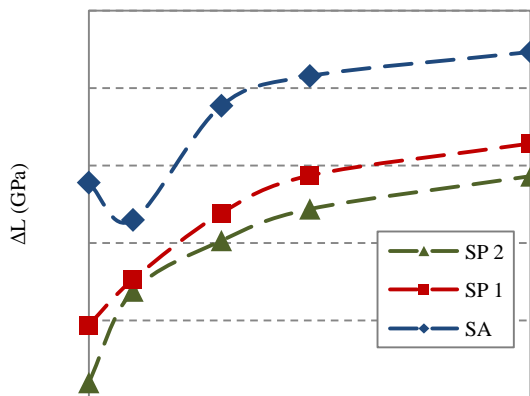


Figura 14 - Influência dos superplastificantes no módulo de elasticidade de BAFRB



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 15 - Influência da incorporação de AFRB na perda de espessura por abrasão

Uma vez que a resistência à abrasão está intrinsecamente associada à resistência da pasta composta por finos e ligante, os resultados são explicados pelo aumento relativo das relações água / cimento, maior para os betões com SP 2. A influência dos superplastificantes sobre a resistência à abrasão é patente na Figura 17, verificando-se um efeito maior destes sobre os BR do que sobre os BAFRB. No entanto, as regressões dos BAFRB não permitem estabelecer uma relação clara entre a influência dos adjuvantes e a taxa de AFRB. A perda de eficiência dos adjuvantes estará relacionada com o aumento da superfície específica dos agregados, como foi referido para a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.

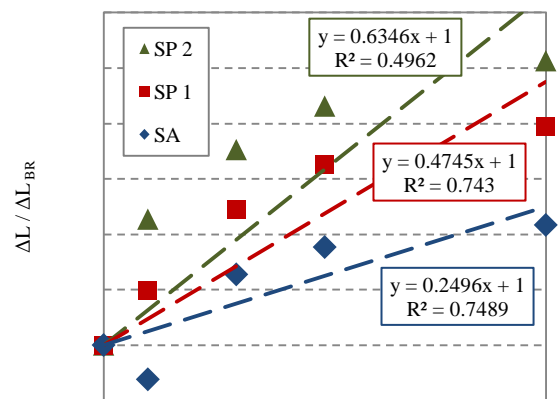
7 - RESTITUIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES RECICLADOS

Foi verificado acima que os BAFRB fabricados com recurso a adjuvantes possuem, de um modo geral, desempenhos abaixo dos do BR. A Equação 7.1 permite determinar a quantidade de superplastificante adicional necessária a um betão com determinada taxa de incorporação de AFRB k e produzido com o adjuvante j para que este atinja um desempenho igual ou superior ao BR (aceitando simplificadaamente que existe uma proporcionalidade entre a quantidade de superplastificante e os seus efeitos no betão).

6 - RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Os resultados da perda de espessura dos provetes de betão (ΔL) são apresentados na Figura 15. A resistência ao desgaste relativa aos BR, em função da taxa de incorporação de AR, é apresentada na Figura 16.

Os valores médios da perda de espessura para betões com a mesma taxa de AFRB foram tanto menores quanto maior o poder redutor de água do superplastificante utilizado. Contudo, em termos relativos, ainda que as correlações das relações estabelecidas não sejam favoráveis, é evidente que os piores desempenhos estão associados aos BAFRB produzidos com superplastificantes. Conclui-se que a influência dos AFRB é tanto maior quanto maior for o desempenho do adjuvante utilizado.



Taxa de incorporação de AFRB

Figura 16 - Perda de espessura por abrasão relativa dos BAFRB aos 91 dias

Neste sentido, $B_{0,k}$ representa a característica mecânica condicionante para o betão com taxa de AFRB k e sem adjuvantes.

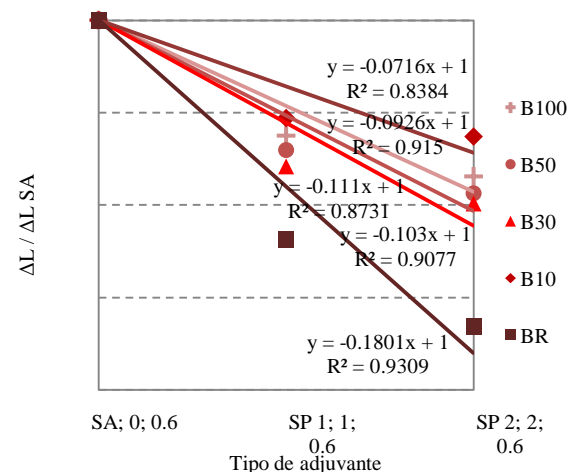


Figura 17 - Influência dos superplastificantes na resistência à abrasão de BAFRB

$$SP_i (\%C) = \frac{\Delta \text{Ganho desejado}}{\Delta \text{Ganho com SP}} \times 1\% = \frac{BR_i - B_{j,k}}{B_{j,k} - B_{0,k}} \times 1\% \quad (7.1)$$

Com esta expressão, foi construído o Quadro 3, que indica as quantidades adicionais de superplastificante em

percentagem da massa de cimento necessárias em função da característica condicionante de cada BAFRB. Este quadro não considera a resistência ao desgaste, por se considerar que a utilização de betões com ARB, já de si rara, o será ainda mais em betões sujeitos a acções abrasivas. Recorde-se que os betões com superplastificantes ensaiados foram produzidos com uma dosagem constante de adjuvante de 1% da massa do cimento.

Sublinhe-se que a expressão indicada em (7.1) é empírica e simplista, uma vez que a eficiência dos adjuvantes depende de muitos factores, nomeadamente no que diz respeito à adsorção às partículas mais finas, podendo-se utilizar apenas como uma aproximação.

Por outro lado, os resultados apresentados no Quadro 3 são apenas aplicáveis a betões cuja composição química seja semelhante a esta (CEM tipo I) e cujo teor de partículas finas seja semelhante, considerando o efeito que estas têm sobre a eficácia dos plastificantes.

Quadro 3 - Quantidade de superplastificante adicional necessário para obter o desempenho dos betões de referência

	BR0		BR1	BR2
	SP 1	SP 2	SP 1	SP 2
BR	0,00	0,00	0,00	0,00
B10	0,11	0,08	0,68	0,07
B30	0,35	0,11	0,72	0,13
B50	0,64	0,27	1,31	0,20
B100	0,86	0,50	1,32	0,32

8 - CONCLUSÕES

Os BAFRB apresentam, na grande maioria dos casos, piores desempenhos mecânicos quando comparados com os respectivos BR. Contudo, podem ser produzidos BAFRB com qualidade suficiente para aplicação estrutural. As seguintes conclusões podem ser retiradas com base nos resultados experimentais e nas respectivas análises:

- a eficácia de superplastificantes é tanto menor quanto maior for a taxa de AFRB incorporada no betão;
- a resistência à compressão é pouco afectada pela incorporação de AFRB; a utilização de superplastificantes aumenta os valores absolutos mas as variações relativas dependem do desempenho do adjuvante;
- verifica-se uma forte perda de resistência à tracção com a incorporação de AFRB; a produção de AFRB com superplastificantes origina resultados absolutos melhores, embora, em termos relativos, os desempenhos dos BAFRB com adjuvantes sejam piores;
- o módulo de elasticidade é também influenciado negativamente pelos AFRB; betões fabricados com SP 2 registaram o melhor desempenho e betões fabricados com SP 1 tiveram menores módulos de elasticidade;

- das características mecânicas ensaiadas, a resistência à abrasão foi a que mais sofreu com a incorporação de AFRB; quanto maior o poder redutor de água do adjuvante, pior foi o desempenho relativo dos BAFRB;
- com excepção da resistência à abrasão, prevê-se que, através de pequenos incrementos da dosagem de superplastificante e através da redução da relação água / cimento se possa produzir BAFRB com desempenho mecânico igual ou superior aos respectivos BR sem adjuvantes, com adjuvantes menos eficientes ou com menores teores de adjuvantes.

Embora a reutilização de AR, no caso dos AFRB, apresente um vasto leque de oportunidades e necessidades de investigação, pode ser concluído que, com base nos resultados obtidos e através do uso de superplastificantes, estes agregados podem ser utilizados em betões estruturais.

9 - REFERÊNCIAS

BRITO, J. (2005) - *Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões*. Lição de síntese para provas de agregação, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

COLLEPARDI, M. (1998) - *Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete*. Cement and Concrete Composites, vol. 20, n.º 2-3, pp. 103-112.

COUTINHO, A. (1988) - *Fabrico e propriedades do betão*. Vol. I, II e III, 4ª edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

EVANGELISTA, L. (2007). - *Betões executados com agregados finos reciclados de betão*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

FROMMENWILER, A. (2000) - *New generation of superplasticizers for high performance concrete (HPC)*. MBT Holding, Switzerland.

HANSEN, T.C. (1992) - *Recycling of demolished concrete and masonry*. RILEM report 6", E & FN Spon, Londres, pp 201-246.

KHATIB, J. M. (2005) - *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and Concrete Research, vol. 35, n.º 4, pp. 763-769.

NIXON, P.J. (1978) - *Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review*. Materials and Structures, vol. 11, no. 5, pp. 371-378.

SIKA (2011), *Sikaplast 898 - Ficha de produto, versão n.º 1*. 3p.

SIKA (2012), *Sikament 400 Plus— Ficha de produto, versão n.º 2*. 3p.

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