

Influência das condições de cura no desempenho mecânico de betões com agregados de reciclados de plástico

Influence of curing conditions on mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregates

Luís Ferreira¹, Jorge de Brito², Nabajyoti Saikia³

¹Eng.º Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

luis.a.v.ferreira@ist.utl.pt

²Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

jb@civil.ist.utl.pt

*³Investigador do ICIST - Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa
saikianj@gmail.com*

RESUMO: Com o intuito de estudar a influência das condições de cura no desempenho mecânico de betões com agregados de resíduos plásticos, produziram-se betões com diferentes taxas de substituição (0, 7,5 e 15 %) de agregados naturais por três tipos de agregados de plástico. O desempenho mecânico foi avaliado em três ambientes de cura (ambiente de laboratório, ambiente exterior e câmara húmida), de forma a retratar as diferentes condições a que o betão pode estar sujeito.

O aumento da percentagem de plástico introduzido e da sua dimensão fez diminuir as resistências à compressão e à tracção por compressão diametral do betão e o seu módulo de elasticidade. Por outro lado, melhorou a sua resistência ao desgaste por abrasão.

Os ambientes mais húmidos foram os que mais beneficiaram o desempenho dos betões sem plástico. Relativamente aos betões com plástico, a sensibilidade às condições de cura varia com a percentagem de substituição e com a propriedade em análise. À medida que aumenta a percentagem de plástico, os ambientes de cura mistos tendem a conduzir aos melhores resultados nas propriedades mais dependentes da ligação dos agregados de resíduos plásticos à pasta de cimento. Regista-se também que a resposta dos betões à introdução de plástico difere entre regimes de cura.

ABSTRACT: To study the influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing waste plastic aggregate several mixes were produced with replacement ratios of 0%, 7.5% and 15% of natural aggregates by three types of plastic aggregate. The mechanical performance was evaluated under three curing environments (laboratory conditions, wet chamber, and outer environment) to represent different conditions concrete may be subject to.

Increasing the ratio of plastic incorporated and its size leads to a fall in compressive and splitting tensile strength and modulus of elasticity of concrete. It improved its wear resistance to abrasion, however.

Damper environments were best for the performance of concrete without plastic. The sensitivity of concrete with plastic to curing conditions changes with the replacement ratio and depends on the property being studied. With higher percentages of plastic the mixed curing environments tended to give the best results for the properties most dependent on the bond between the plastic waste aggregates and the cement paste. It was also found that the response of concrete to the incorporation of plastic differs between curing regimes.

1. INTRODUÇÃO

A produção e o consumo de plástico e a taxa de criação de resíduos sólidos de plástico (RSP) têm aumentado consideravelmente desde a primeira produção em escala industrial de polímeros sintéticos (plásticos), na década de 1940 (Al-Salem et al., 2009). De acordo com o Central Pollution Control Board, a produção mundial de plásticos é da ordem de 150 milhões de toneladas por ano, o que corresponde a 4,8 toneladas por segundo e a uma produção per capita 25 kg/ano. Iadav (2008) estima que a produção mundial de resíduos de plástico duplica a cada dez anos. Só em Portugal, e segundo dados do INE, foram geradas em média, nos 3 últimos anos, 466 mil toneladas de resíduos plásticos.

Face ao aumento desmedido desta indústria, é necessário criar soluções eficazes para escoar os seus resíduos. Através de processos térmicos é possível recuperar o seu poder calorífico, mas tal leva à libertação de gases tóxicos que se podem revelar perigosos para a saúde pública. Face à sua natureza volumosa e morosa biodegradação, a deposição destes resíduos em aterro torna-se impraticável. Apesar de haver outras alternativas, a reutilização do plástico na produção de outros materiais, nomeadamente de betão, aparenta ser uma das formas mais económicas e ecológicas de escoar estes resíduos (Saikia e de Brito, 2011).

2. ENQUADRAMENTO

As primeiras investigações efectuadas sobre esta temática remontam à década de 90 do século XX e referem-se ao reforço de betão com fibras de plástico, tendo-se sucedido o interesse por betões com resinas poliméricas e, mais recentemente, os agregados de plástico (Lopes, 2010).

Para que o betão atinja o desempenho esperado, a uma mistura cuidada deve-se seguir um adequado regime de cura, principalmente nos primeiros dias de endurecimento (Neville, 1983). O efeito das condições de cura, embora relativizado por alguns autores, tem sido alvo de um crescente número de investigações que confirmam o seu contributo para o desempenho do betão.

Quanto ao desempenho mecânico dos betões com agregados de resíduos de plástico (ARP), a

bibliografia parece ser relativamente consensual. Já no que respeita à influência das condições de cura nesse desempenho, a opinião não é tão unânime. É no sentido de explorar este segundo item e, em particular, a influência da introdução de agregados de plástico na susceptibilidade dos betões às condições de cura que surge a oportunidade desta investigação.

A trabalhabilidade das amassaduras está fortemente relacionada com a forma, textura e absorção dos agregados. Os agregados mais angulosos e rugosos (PET lamelares - Pc e Pf - de Saikia e de Brito (2011), PET de Albano et al. (2009), PET de Ismail e Al-Hashmi (2008), PVC de Kou et al. (2009)) limitam a trabalhabilidade dos betões, ao passo que os agregados mais esféricos e lisos (PET cilíndricos - Pp - de Saikia e de Brito (2011) e PET de Choi et al. (2005)) têm propensão para a melhorar. Os agregados mais porosos (espuma de PUR de Fraj et al. (2010)) reduzem a trabalhabilidade da mistura. No que respeita à massa volúmica, a bibliografia é unânime quanto à diminuição desta propriedade com o aumento da taxa de incorporação de ARP.

A maioria das referências bibliográficas remete para uma perda de desempenho, a nível da resistência à compressão, tracção por compressão diametral e módulo de elasticidade, com a introdução de ARP no betão. As causas sugeridas para explicar esta tendência são o decréscimo da força de ligação entre o agregado e a pasta ligante e a fraca afinidade entre o plástico e a água, repelindo-a da matriz cimentícia, limitando assim as condições necessárias à hidratação do cimento e, conseqüentemente, ao endurecimento do betão durante o seu período de cura.

Relativamente à resistência ao desgaste por abrasão, Saikia e de Brito (2011) registaram um decréscimo do desgaste com a introdução de ARP, explicando-o com a maior tenacidade e resistência à abrasão dos ARP face aos agregados naturais (NA). Soroushian et al. (2003) depararam-se com um aumento da profundidade de desgaste ao introduzirem fibras de plástico. Estes justificam esta tendência com o facto de as fibras junto à superfície de teste do provete terem propensão para se desligarem da mistura, contribuindo para a perda de material.

Os betões com ARP podem tornar-se vantajosos do ponto de vista da eficiência energética e de conforto térmico, podem ser mais dúcteis e mais capazes de absorver deformações

sem que ponham em causa a sua integridade (Elzafraney et al. (2005), Hannawi et al. (2010) e Frigione (2010)).

Por cura do betão, designam-se os diferentes meios que se empregam para impedir a evaporação de água de amassadura (Coutinho, 1988). A necessidade de cura surge porque a hidratação do cimento só pode ter lugar em interstícios preenchidos com água, razão pela qual a evaporação da água destes vazios tem de ser prevenida e a água perdida deve ser repostada com água do exterior (Neville, 1983).

Factores como a percentagem / valor, a duração e o período em que actuam a humidade e a temperatura no processo de cura do betão têm sido abordados pelas referências estudadas. No entanto, estas investigações referem-se a betões com sílica de fumo (Atis et al., 2005, Ramezani pour e Malhotra, 1995 e Turkmen e Kantarci, 2006), com escórias de alto-forno (Guneyisi et al., 2005 e Ramezani pour e Malhotra, 1995), filer calcário (Guneyisi et al., 2005 e Bonavetti et al., 2000), pozolanas naturais (Guneyisi et al., 2005), gesso (Guneyisi et al., 2005), cinzas volantes (Ramezani pour e Malhotra, 1995), agregados grossos de betão reciclado (Fonseca, 2009) e perlite expandida (Turkmen e Kantarci, 2006).

Existem investigações (Chen e Liu, 2007 e Ling e Teo, 2011) que avaliam as repercussões que os diferentes parâmetros de cura têm na resistência à compressão de betões que têm na sua constituição agregados de poliestireno expandido. Porém, não foram encontrados nenhuns estudos que o façam com agregados de PET nem nenhum que estude a influência que a introdução do plástico tem na susceptibilidade do betão ao processo de cura.

A bibliografia é consideravelmente consensual em relação ao facto de as condições de cura com maiores níveis de humidade proporcionarem melhores desempenhos mecânicos nos betões produzidos sem ARP. Relativamente às amassaduras com ARP, Ohama (1995), citado por Chen e Liu (2005), defende que os ambientes húmidos optimizam a hidratação do cimento por um lado e, por outro, os ambientes mais secos fomentam a criação da película ligante entre os polímeros e a mistura cimentícia. Assim, os regimes de cura mistos pareceriam ser os mais propícios ao melhor desempenho dos betões com plástico.

Pensa-se também que a temperatura durante a cura pode ter consequências no desempenho mecânico sobretudo nos primeiros três dias de cura. Elevadas temperaturas iniciais podem traduzir-se em altas resistências iniciais mas revelam-se prejudiciais no desempenho em idades mais avançadas (Kim et al., 1988).

Os betões com adições na mistura ligante mostraram-se mais sensíveis à variabilidade das condições de cura. Porém, para betões com ARP não foi encontrada informação, nesta pesquisa bibliografia, passível de conduzir a conclusões semelhantes.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

O conjunto das amassaduras que sustentou esta investigação foi produzido a partir de agregados naturais (AN) e agregados de resíduos de plástico (ARP). Os AN grossos são britados e os finos rolados e os ARP resultam da trituração de resíduos reciclados de garrafas de PET. Os ARP são de três tipos (Figura 1): Pc e Pf, lamelares e irregulares, sendo os primeiros maiores do que os segundos e os Pp um granulado cilíndrico regular resultado de um pós-tratamento a esses resíduos. O cimento utilizado foi um CEM II A-L 42,5 R.

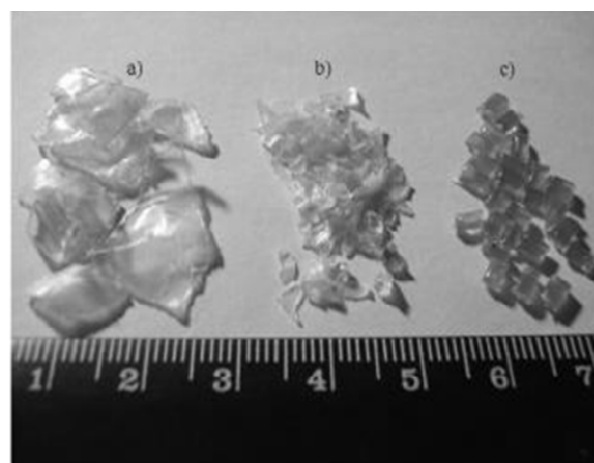


Figura 1 - Tipos de plásticos usados na campanha experimental: a) Pc; b) Pf; c) Pp

3.2. Procedimentos

A caracterização dos agregados foi feita com base nos ensaios normalizados e especificados no

Quadro 1 e os resultados destes são apresentados no Quadro 2.

Nesta investigação, produziu-se betões com diversas composições, resultantes de diferentes taxas de substituição de AN por ARP. Para cada condição de cura, produziu-se betões com 6 composições diferentes definidas em conformidade com os resultados de Saikia e Brito (2011). As seis amassaduras designam-se por: BR (betão só com AN), B7.5Pp (betão com substituição de 7,5% de AN por ARP - Pp), B15Pp (betão com substituição de 15% de AN por ARP - Pp), B7.5Pf (betão com substituição de 7,5% de AN por ARP - Pf), B15Pf (betão com substituição de 15% de AN por ARP - Pf) e B7.5Pc (betão com substituição de 7,5% de AN por ARP - Pc). As percentagens são em volume.

Quadro 1 - Ensaio de caracterização dos agregados

Ensaio	Norma adoptada
Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000) / NP EN 933-2 (1999)
Massas volúmicas e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Baridade e índice de vazios	NP EN 1097-3 (2000)
Desgaste de <i>Los Angeles</i>	LNEC E 237 (1970)
Índice de forma	NP EN 933-4 (2002)

Quadro 2 - Resultados dos ensaios aos agregados

Propriedade	Resultados				
	AN grossos	AN finos	Pc	Pf	Pp
Massa volúmica (kg/m ³)					
Do material impermeável das partículas	2727.0	2595.5	1315.7	1275.0	1312.5
Das partículas secas em estufa	2683.6	2591.0	1303.1	1273.5	1306.3
Das partículas saturadas com a superfície seca	2699.5	2592.7	1312.7	1274.7	1311.1
Absorção de água (após 24h de imersão em água)	0.60	0.12	0.73	0.09	0.36
Baridade e volume de vazios (kg/m ³)	1427.6	1461.2	261.4	438.2	738.7
Índice de forma (%)	13.6	-	-	-	-
Desgaste de <i>Los Angeles</i>	30.7	-	-	-	-

Os betões produzidos não contêm adições e objectivou-se, para o BR, uma classe de resistência C30/37. Para poder comparar os resultados, tentou-se manter as mesmas condições de trabalhabilidade, definidas *a priori* (S3 - 130 ± 10 mm), em todo o betão produzido. Para isso, fez-se correcções das relações a/c definidas por Saikia e de Brito (2011) para as mesmas amassaduras. As

composições das amassaduras, bem como as suas relações a/c definitivas, são apresentadas no Quadro 3.

O betão foi produzido, introduzido nos moldes e vibrado (com um vibrador de agulha) segundo os procedimentos normalizados e mantido durante 24 horas na zona de betonagem, ao fim das quais foi transferido para o seu ambiente de cura.

O reflexo das condições de cura no desempenho mecânico dos betões produzidos representa o cerne desta investigação. Para o estudar, foram reproduzidos três ambientes de cura distintos, com diferentes condições de temperatura e humidade, tentando retratar as mais diferentes condições a que o betão pode estar sujeito:

- LCC - *laboratory conditions curing* (cura em ambiente de laboratório);
- WCC - *wet chamber curing* (cura em câmara húmida);
- OEC - *outer environment curing* (cura em ambiente exterior).

Quadro 3 - Composição e relação água / cimento das amassaduras produzidas

Betão	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregados naturais (kg/m ³)		Agregados de plástico (kg/m ³)			a/c	
			Grossos	Finos	Pc	Pf	Pp		
									Ref
B7.5Pc	350	213.5	855.0	750.4	61.4	-	-	-	0.61
B7.5Pp	350	185.5	1008.3	668.4	-	-	66.9	0.53	
B15Pp	350	178.5	1018.6	537.4	-	-	135.1	0.51	
B7.5Pf	350	196.0	992.7	660.0	-	64.2	-	0.56	
B15Pf	350	210.0	972.1	516.7	-	125.7	-	0.6	

No ambiente LCC, os provetes foram colocados em laboratório, proporcionando-lhes o ambiente menos húmido dos três referidos. Na Figura 2, são apresentados dois excertos do registo de temperatura e humidade, captados em ambiente LCC, referentes a dois dias do mesmo mês, de condições atmosféricas (no exterior) muito distintas.

A cura WCC foi preconizada no interior da câmara húmida, onde a temperatura e a humidade se revelam constantes e cujos valores são, respectivamente, 20 °C e 100%. Esta condição de cura, por proporcionar a saturação dos espécimes, é a que promove a melhor hidratação da matriz cimentícia.

No ambiente OEC, os provetes foram expostos directamente às condições climáticas exteriores. Este é um ambiente misto, onde se registam os

maiores gradientes de temperatura e de humidade. Dada a estação do ano em que o trabalho de laboratório se desenvolveu, este ambiente proporcionou condições de humidade que o aproximaram mais do WCC do que do LCC. Na Figura 3, são apresentados dois excertos do registo de temperatura e humidade dos mesmos dias que foram representados para o regime LCC, mas desta vez captados em ambiente OEC.

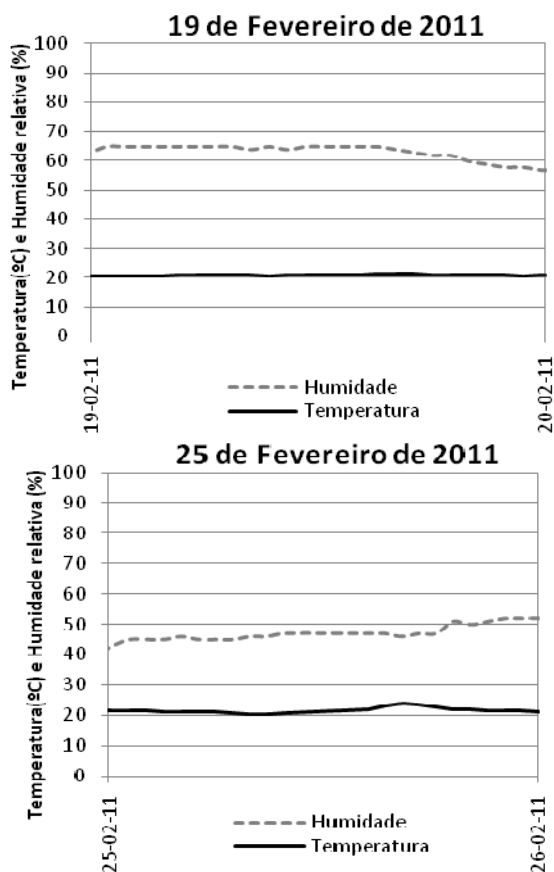


Figura 2 - Condições de humidade e temperatura de dois dias do mês de Fevereiro em regime LCC

Os métodos usados nos ensaios ao betão fresco e endurecido são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Ensaios adoptados na determinação das propriedades do betão fresco e endurecido

Ensaio	Norma
Betão fresco	
Abaixamento (<i>cone de Abrams</i>)	NP EN 12350-2
Massa volúmica	NP EN 12350-6
Betão endurecido	
Resistência à compressão	NP EN 12390-3
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6
Módulo de elasticidade	LNEC E 397
Resistência à abrasão	DIN 52108

Para os ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias, foram produzidos, respectivamente, 3, 5 e 3 espécimes cúbicos de 150 mm x 150 mm x 150 mm. Para a resistência à tracção por compressão diametral, foram produzidos 3 provetes cilíndricos com Ø150 mm x 300 mm para ensaiar aos 28 dias. Destes 3 provetes, 2 foram ensaiados, à mesma idade, ao módulo de elasticidade (ensaio não destrutivo): Para a resistência à abrasão, foram produzidos 2 espécimes cúbicos de 100 x 100 x 100 mm, posteriormente cortados, dando origem a 4 provetes de 71 mm x 71 mm x 50 mm.

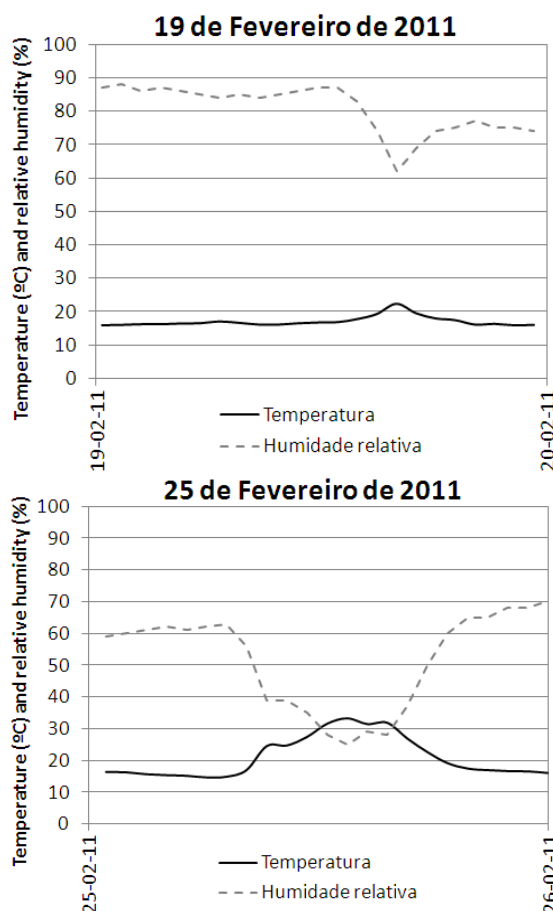


Figura 3 - Condições de humidade e temperatura de dois dias do mês de Fevereiro em regime LCC

Estes provetes referem-se apenas a uma composição e uma condição de cura. O total de provetes resulta das quantidades referidas multiplicadas por 6 composições e 3 condições de cura.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Ensaios ao betão fresco

4.1.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade das amassaduras produzidas foi fixada por um abaixamento de 130 ± 10 mm, o que também o efeito de manter a relação a/c efectiva praticamente constante em todas as amassaduras produzidas, de modo a permitir análises comparativas entre tipos e teores de ARP e entre condições de cura.

A forma, tamanho e rugosidade das partículas que a constituem mostraram ter forte influência na consistência da mistura. Os plásticos Pc e Pf, por serem mais lamelares e angulosos do que os AN, produzem um efeito diferente dos Pp, que têm uma forma mais esférica e regular. Assim, a introdução de Pc e Pf nas amassaduras torna-as menos trabalháveis, obrigando ao aumento da relação a/c para verificarem os limites de consistência impostos. Por outro lado, os Pp promovem a trabalhabilidade dos betões em que são incorporados. Segundo Saikia e de Brito (2011), esta diferença de comportamento justifica-se com a diferente fricção interna entre os ARP e a pasta ligante. Os Pc, apesar de terem a mesma forma e rugosidade, são maiores do que os Pf, limitando mais a trabalhabilidade do que os Pf. Isso pode ser explicado pela maior porosidade que introduzem na mistura.

Na Figura 4, são representadas as curvas que definem a evolução da relação a/c em função da percentagem de ARP incorporados.

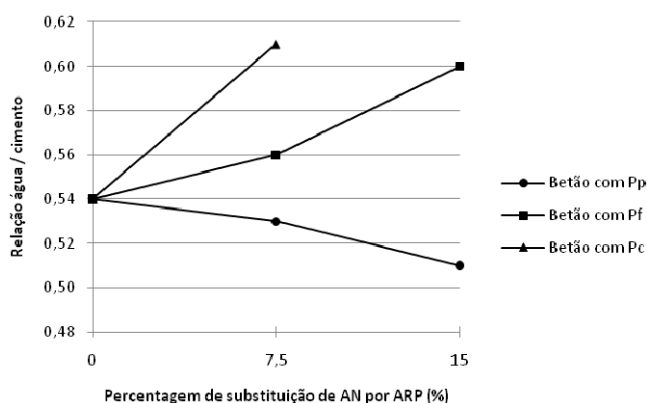


Figura 4 - Relação água / cimento em função de percentagem de ARP nas amassaduras

4.1.2. Densidade do betão fresco

Quanto à massa volúmica (Figura 5), nota-se uma perda à medida que se introduz ARP no betão. Este resultado era expectável dada a diferença de massa volúmica entre os AN e os ARP. Este decréscimo é maior para os ARP com

menor massa volúmica, Pc e Pf, e ligeiramente menor para os Pp que, dado o tratamento a que foram sujeitos, apresentam uma massa volúmica maior.

4.2. Ensaio ao betão fresco

4.2.1. Resistência à compressão

Nas Figuras 6, 7 e 8, são apresentados os valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias, respectivamente, de todas as amassaduras, para todas as condições de cura.

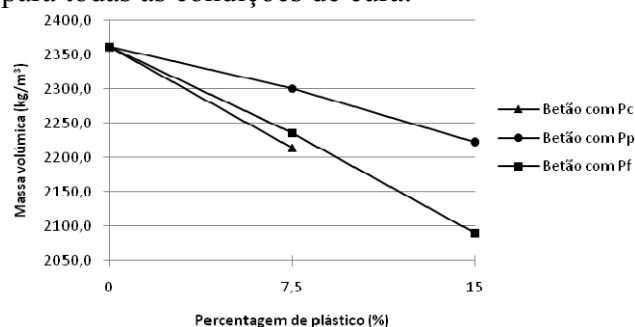


Figura 5 - Massa volúmica em função da percentagem de ARP nas amassaduras

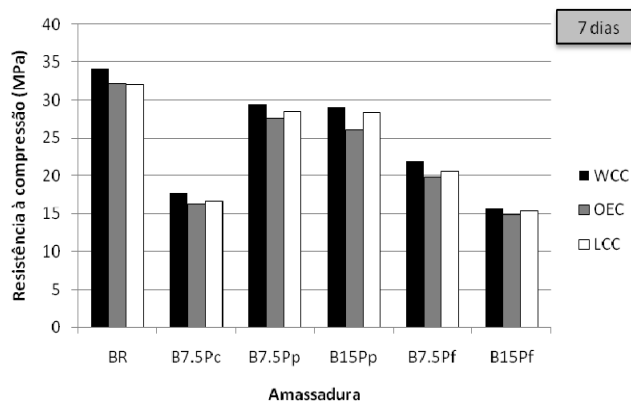


Figura 6 - Resultados da resistência à compressão para as várias condições de cura (aos 7 dias)

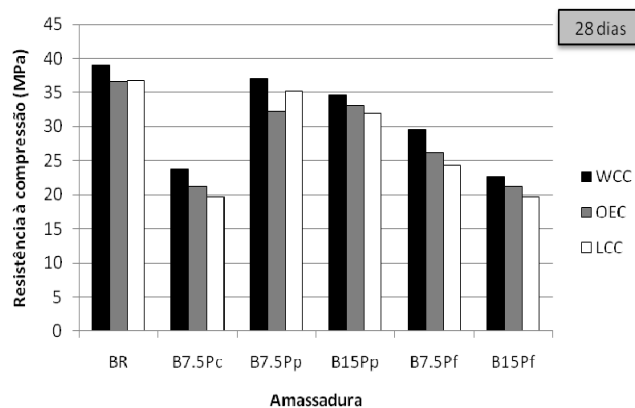


Figura 7 - Resultados da resistência à compressão para as várias condições de cura (aos 28 dias)

Os resultados revelam que, à medida que se introduz ARP no betão, a resistência à compressão deste diminui, independentemente do tipo e período de cura ou do tipo de plástico. Como os ARP são rugosos e têm pouca afinidade com a água, repelem-na, limitando assim a reacção de hidratação do cimento na interface ARP - matriz cimentícia, condicionando esta ligação (Ismail e Al-Hasmi, 2008 e Saikia e de Brito, 2011).

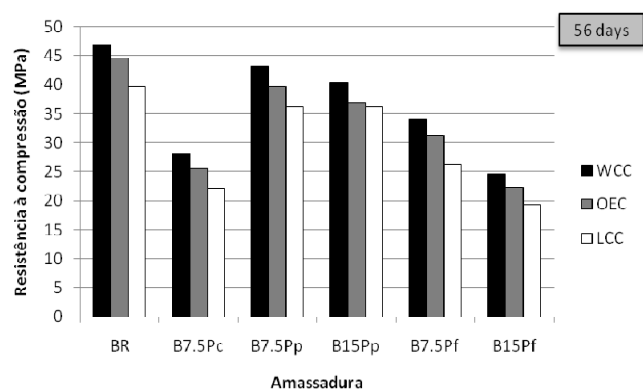


Figura 8 - Resultados da resistência à compressão para as várias condições de cura (aos 56 dias)

A diminuição da resistência à compressão difere consoante o tipo de plástico. É maior para os betões com ARP lamelares (Pc e Pf) e menor para os ARP de geometria mais esférica (Pp). Dentro dos lamelares, a perda é maior para os ARP de maior dimensão. Isto deve-se à diferença de trabalhabilidade que a sua incorporação traz à mistura, o que se reflecte na sua relação a/c.

Relativamente à influência das condições de cura, esperava-se que os resultados mais elevados correspondessem ao regime de cura que facultava mais água ao processo de hidratação do cimento,

o WCC. Face às condições atmosféricas registadas durante o período de cura destes espécimes, esperava-se que o ambiente OEC produzisse resultados próximos, embora ligeiramente abaixo, dos do WCC e o ambiente LCC conduzisse aos resultados mais baixos dos três ambientes. Os resultados só começaram a tomar a disposição prevista a partir dos 28 dias de endurecimento, embora se esperasse uma maior proximidade entre os resultados dos ambientes WCC e OEC.

Aos 7 dias, os provetes curados em regime LCC manifestaram resistências à compressão da ordem ou ligeiramente superiores às do ambiente OEC. Estes resultados indicam que, à semelhança do que foi registado por Kim et al. (1988), os provetes sujeitos a temperaturas iniciais mais elevadas, atingem maiores resistências iniciais. Contudo, para idades mais avançadas, esta relação dá-se no sentido inverso.

Para avaliar a relevância da introdução de ARP na susceptibilidade dos betões ao regime de cura e vice-versa, foram usados ajustes estatísticos do tipo regressão linear fictícia. A cada conjunto de pontos (percentagem de ARP / resistência à compressão), referente a cada uma das amassaduras, foi ajustada uma recta e atribuída uma equação e um coeficiente de determinação. Este processo foi seguido para as restantes propriedades e feito para todas as amassaduras, segundo os três ambientes de cura. O declive das rectas representa um bom indicador da susceptibilidade de cada betão à incorporação de ARP. No Quadro 5, são apresentadas as equações e os respectivos coeficientes de determinação.

Quadro 5 - Relações entre a percentagem de ARP e a resistência à compressão para os diferentes ambientes de cura

		7 dias		28 dias		56 dias	
		Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
OEC	Pc	$y = -6.60x + 100$	1,00	$y = -5.62x + 100$	1,00	$y = -5.70x + 100$	1
	Pf	$y = -3.90x + 100$	0,93	$y = -3.01x + 100$	0,95	$y = -3.46x + 100$	0,99
	Pp	$y = -1.40x + 100$	0,91	$y = -0.83x + 100$	0,5	$y = -1.23x + 100$	0,97
LCC	Pc	$y = -6.39x + 100$	1,00	$y = -6.18x + 100$	1,00	$y = -5.90x + 100$	1
	Pf	$y = -3.74x + 100$	0,95	$y = -3.37x + 100$	0,92	$y = -3.64x + 100$	0,96
	Pp	$y = -0.91x + 100$	0,74	$y = -0.81x + 100$	0,94	$y = -0.69x + 100$	0,7
WCC	Pc	$y = -6.45x + 100$	1,00	$y = -5.20x + 100$	1,00	$y = -5.32x + 100$	1
	Pf	$y = -3.85x + 100$	0,96	$y = -2.87x + 100$	0,99	$y = -3.26x + 100$	0,99
	Pp	$y = -1.18x + 100$	0,78	$y = -0.73x + 100$	1,00	$y = -0.95x + 100$	0,99

A resistência à compressão parece ser mais sensível à introdução de Pp se os betões curarem em regime OEC e menos sensível se curarem em ambiente LCC. O facto de a relação a/c destas amassaduras ser mais reduzida faz com que estas precisem de menos humidade durante a cura, o que pode fazer com que estas amassaduras sejam menos susceptíveis à carência de humidade do que o BR. Assim, a diferença percentual de desempenho que resulta da incorporação de Pp diminui. No entanto e seguindo esta linha de pensamento, o regime WCC, por ser mais húmido, deveria gerar uma diferença maior entre o BR e as amassaduras com Pp.

Os betões com Pc e Pf, por terem maiores relações a/c, mostram-se mais vulneráveis à falta de humidade no processo de cura. À excepção dos 7 dias, em que ainda não se nota a influência da cura, a resistência à compressão destes betões regista o maior declínio (por percentagem de ARP) para a condição de cura LCC, a que possui níveis mais baixos de humidade relativa. Segue-se o regime OEC e, por fim, o que proporciona menores perdas de desempenho (por percentagem de ARP), o WCC. Esta vulnerabilidade pode encontrar a sua explicação no facto de as amassaduras com maior relação a/c (amassaduras com Pc e com Pf) terem propensão para ser mais porosas, permitindo a evaporação precoce da água livre do betão (Atis et al., 2005). Ao aumentar o tamanho dos ARP, a porosidade da mistura aumenta, aumentando este efeito, razão pela qual a resistência à compressão dos betões com Pc é mais sensível à percentagem de plástico do que a dos betões com Pf.

4.2.2. Resistência tracção por compressão diametral

Na Figura 9, estão representados os valores da resistência à tracção por compressão diametral para todas as condições de cura.

Como esperado, a resistência à tracção por compressão diametral diminui com o aumento do teor de ARP, sendo que a maior e a menor reduções se dão nos betões com Pc e com Pp, respectivamente. As razões destas tendências são as apresentadas no estudo da influência dos ARP na resistência à compressão das amassaduras.

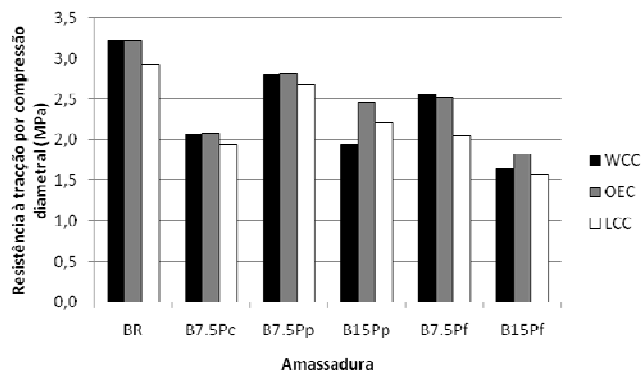


Figura 9 - Resultados da resistência à tracção por compressão diametral para as várias condições de cura

Relativamente à resistência à compressão, a resistência à tracção por compressão diametral revela-se menos sensível à introdução de Pc mas mais sensível aos Pf e Pp. Isto pode estar associado à diferente relevância que os factores “dimensão dos ARP” e “força de ligação entre os ARP e a matriz cimentícia” assumem nestas duas propriedades. A resistência à tracção parece ser menos influenciada pela dimensão das partículas e mais pela referida ligação.

No que respeita às condições de cura, aguardavam-se melhores resultados para as que proporcionam aos espécimes teores de humidade mais elevados. Isso cumpriu-se para o BR e para os BAP com taxas de ARP até 7,5%. Para os betões com 15% de plástico, a cura que origina melhores resultados é a OEC. Ohama (1995), citado por Chen e Liu (2005), defende que, por um lado, os ambientes húmidos optimizam a hidratação do cimento e, por outro, os ambientes mais secos fomentam a criação da película ligante entre os polímeros e a mistura cimentícia. Esta teoria pode explicar os resultados aqui obtidos, sabendo que o OEC é um ambiente de cura misto e que, para betões com maiores percentagens de plástico, este equilíbrio se torna mais relevante.

Para avaliar a importância da introdução de ARP na susceptibilidade da resistência à tracção por compressão diametral ao regime de cura e vice-versa, foram feitas, tal como para a resistência à compressão, regressões lineares simples para todas as amassaduras, segundo os três ambientes de cura. No Quadro 6, são apresentadas as equações e os respectivos coeficientes de determinação.

A susceptibilidade da resistência à tracção (por compressão diametral) à incorporação de Pc e Pf varia pouco entre as condições de cura, sendo

ligeiramente menor para o ambiente mais seco, o LCC. As misturas que parecem ser mais sensíveis às condições de cura são as com Pp. O ambiente WCC evidencia perdas significativamente maiores de resistência destas amassaduras do que os outros dois. Tendo relações a/c mais baixas, estas amassaduras são menos porosas, havendo menos água livre que evapora, sendo necessária uma menor quantidade de água para a repor. Assim, a água em excesso pode opor-se à criação da película ligante entre os polímeros e a mistura cimentícia, condicionando a sua resistência à tracção. Como, para o BR, os elevados teores de humidade são benéficos ao seu endurecimento, a diferença entre as resistências do BR e dos betões com Pp torna-se maior.

Quadro 6 - Relação entre a percentagem de ARP e a resistência à tracção por compressão diametral para os diferentes ambientes de cura

28 dias		Equação	R ²
OEC	Pc	$y = -4.71x + 100$	1.00
	Pf	$y = -2.90x + 100$	1.00
	Pp	$y = -1.59x + 100$	1.00
LCC	Pc	$y = -4.46x + 100$	1.00
	Pf	$y = -3.28x + 100$	0.97
	Pp	$y = -1.54x + 100$	0.96
WCC	Pc	$y = -4.79x + 100$	1.00
	Pf	$y = -3.16x + 100$	0.99
	Pp	$y = -2.47x + 100$	0.96

4.2.3. Módulo de elasticidade

Na análise aos resultados do módulo de elasticidade, representados na Figura 10, nota-se uma diminuição com o aumento do teor de ARP. Esta diminuição pode associar-se à diferença significativa que existe entre os módulos de elasticidade dos AN e dos ARP e às causas sugeridas para as outras propriedades analisadas. Independentemente da condição de cura, as maiores perdas de módulo de elasticidade por percentagem de plástico introduzido registam-se para os betões com Pc e as menores para os com Pp. Isto pode ser o reflexo da diferença das relações a/c e das conseqüentes diferenças na porosidade dos betões.

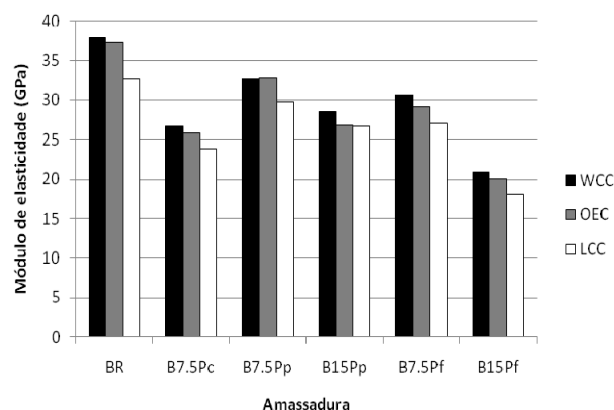


Figura 10 - Resultados do módulo de elasticidade para as várias condições de cura

O valor do módulo de elasticidade aumenta com a percentagem de humidade relativa do regime de cura. Em geral, a cura com maior humidade relativa (WCC) é a que produz melhores resultados, seguida da cura que, neste período, registou elevadas taxas de humidade relativa (OEC) e, por fim, a cura mais seca (LCC).

Tal como se fez para as outras propriedades, a susceptibilidade do módulo de elasticidade aos regimes de cura para os betões com introdução dos vários tipos de ARP e vice-versa foi analisada de acordo com os declives da regressão linear fictícia dos três ambientes de cura. No Quadro 7, são apresentadas as equações e os respectivos coeficientes de determinação.

Tal como nas outras propriedades, os betões com Pp são os mais variam entre condições de cura. Todas as amassaduras aparentam ter menos perdas relativas de módulo de elasticidade quando curadas em ambiente mais seco (LCC), o que também se verificou na resistência à compressão aos 7 dias e na resistência à tracção por compressão diametral.

Quadro 7 - Relação entre a percentagem de ARP e o módulo de elasticidade para os diferentes ambientes de cura

28 dias		Equação	R ²
OEC	Pc	$y = -4.12x + 100$	1.00
	Pf	$y = -3.04x + 100$	1.00
	Pp	$y = -1.81x + 100$	0.99
LCC	Pc	$y = -3.62x + 100$	1.00
	Pf	$y = -2.83x + 100$	0.98
	Pp	$y = -1.19x + 100$	1.00
WCC	Pc	$y = -3.94x + 100$	1.00
	Pf	$y = -2.90x + 100$	0.99
	Pp	$y = -1.68x + 100$	0.99

O regime OEC é o que torna o módulo de elasticidade dos betões mais susceptível à introdução de ARP. Apesar da proximidade dos valores, esperava-se que fosse o ambiente WCC a tomar esta posição visto que, ao ser um regime mais favorável ao endurecimento do BR e, por outro lado, o que mais condiciona a ligação dos ARP à pasta ligante, devia resultar em maiores perdas por percentagem de ARP.

4.2.4. Resistência à abrasão

O uso de ARP melhora a resistência ao desgaste por abrasão do betão (Figura 11). Associa-se este aumento de resistência à maior tenacidade e à mais elevada resistência à abrasão dos ARP face aos AN.

Vários autores (Naik et al. (1944) e Atis et al. (2002), citados por Li et al. (2006)) referem a importância da rugosidade dos agregados e da sua ligação à matriz cimentícia no desenvolvimento desta propriedade. Neste caso, estes dois factores pouco variam entre as amassaduras, podendo ser por isso que os três tipos de ARP suscitaram o mesmo tipo de comportamento ao desgaste no betão.

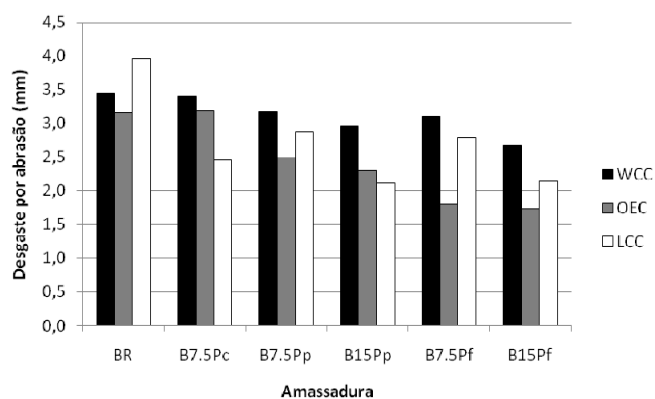


Figura 11 - Resultados do desgaste por abrasão para as várias condições de cura

Acerca da influência da cura no desgaste dos betões não foi possível tirar conclusões sólidas. Porém, pode-se concluir que o ambiente OEC conduz sempre a valores de desgaste inferiores aos do WCC e isso pode dever-se ao facto de a cura mista promover uma melhor ligação dos ARP à matriz ligante. Para betões com ARP, o regime WCC é sempre o mais desfavorável do ponto de vista da resistência à abrasão, o que pode ser explicado pela ausência de períodos

secos que promovam a constituição da película ligante entre os ARP e a mistura.

Esta amostra de resultados não é conclusiva no que respeita à relação entre os ambientes LCC e OEC. Esperava-se que o OEC, por ter as duas vertentes da cura já referidas, fosse o que proporcionasse melhores resistências ao desgaste e o LCC, por não ter períodos mais húmidos, prejudicasse a hidratação do cimento e levasse a menores resistências ao desgaste.

Para o BR e no sentido das expectativas, o ambiente que regista o maior desgaste é o LCC. Por outro lado, como esta amassadura não contém plástico e dispensa à partida períodos de cura seca, esperava-se que o ambiente WCC fosse o que promovesse maior resistência à abrasão. Na verdade, o ambiente que regista o menor desgaste é o OEC.

Para comparar a susceptibilidade desta propriedade às condições de cura em betões com incorporação de plástico e vice-versa, os resultados foram submetidos ao tratamento estatístico até aqui utilizado e as equações de regressão linear fictícia e os respectivos coeficiente de determinação constam do Quadro 8.

Quadro 8 - Relação entre a percentagem de ARP e o desgaste por abrasão para os diferentes ambientes de cura

91 dias		Equação	R ²
OEC	Pc	$y = 0.16x + 100$	1.00
	Pf	$y = -3.54x + 100$	0.74
	Pp	$y = -2.00x + 100$	0.89
LCC	Pc	$y = -5.05x + 100$	1.00
	Pf	$y = -3.24x + 100$	0.97
	Pp	$y = -3.21x + 100$	0.99
WCC	Pc	$y = -0.14x + 100$	1.00
	Pf	$y = -1.44x + 100$	1.00
	Pp	$y = -0.95x + 100$	1.00

Os betões curados em ambiente LCC foram os que mais beneficiaram com a introdução de ARP. Este ambiente, por ter menor teor de humidade relativa, não favorece a reacção de hidratação do cimento, assumindo-se como o pior regime, em termos de resistência ao desgaste, para o BR. Em betões com ARP, a carência de humidade do ambiente LCC não é tão prejudicial, chegando mesmo a ser o regime que origina betões com menos desgaste por abrasão. Esta diferença faz com que a diminuição percentual do desgaste por

abrasão seja mais acentuada. No ambiente WCC, a situação inverte-se. Este proporciona ao BR as melhores condições de hidratação da pasta de cimento, conferindo-lhe o menor valor de desgaste comparativamente às outras condições de cura. Por outro lado, sobre os betões com ARP, este ambiente é o mais desfavorável, levando aos maiores desgastes por abrasão. Assim, a diferença percentual diminui, sendo este o ambiente menos susceptível à introdução de ARP.

Por fim, acrescenta-se que ambiente OEC foi o que vincou mais as diferenças entre os ARP no desgaste por abrasão.

5. CONCLUSÕES

Depois da análise da influência da introdução de ARP no desempenho mecânico do betão e da importância das condições de cura sobre este desempenho, sumariaram-se as principais tendências no Quadro 9.

Quadro 9 - Resumo das tendências verificadas entre os resultados das várias condições de cura, para as várias propriedades

Propriedade	BPc			BPf			BPp		
	WCC	OEC	LCC	WCC	OEC	LCC	WCC	OEC	LCC
Resistência à compressão	7 dias	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
	28 dias	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
	56 dias	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Resistência à tracção por compressão diametral	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Módulo de elasticidade	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Resistência à abrasão	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗

Neste quadro, a posição relativa de cada ambiente de cura dentro de cada tipo de betão (BPc, BPf e BPp) é definida através da quantidade dos símbolos “-“, se o valor da propriedade diminui com a introdução de plástico, ou “+“, se o seu valor aumenta. A menor quantidade destes símbolos corresponde à variação menos acentuada e a maior à mais acentuada. A inclinação dada às setas pretende estabelecer uma relação entre os diferentes tipos de plástico, sendo que a maior inclinação corresponde, naturalmente, à maior variação por percentagem de ARP usado.

Com este estudo chegou-se às seguintes conclusões:

- à medida que se introduz ARP no betão, a sua resistência à compressão, resistência à tracção e módulo de elasticidade diminuem, independentemente do tipo e período de cura ou do tipo de plástico; esta diminuição é tanto maior quanto maior for a relação a/c da amassadura; assim, os Pc são os que mais prejudicam o desempenho dos betões nestas propriedades, seguidos dos Pf e Pp;

- os regimes mais secos conferem maiores resistências à compressão nas primeiras idades, ao passo que os mais húmidos o fazem a médio / longo prazo;

- a resistência à compressão é mais sensível à introdução de Pp quando os betões curam em regime OEC e menos sensível em ambiente LCC; relativamente aos betões com Pc e Pf, registam maiores declínios (por percentagem de ARP) para a condição de cura LCC, seguida da OEC e, por fim, da WCC;

- o BR e os betões com taxas de ARP até 7,5% registaram maiores resistências à tracção por compressão diametral para os regimes de cura com maior teor de humidade (WCC e OEC); o mesmo não aconteceu com as amassaduras com 15% de ARP, que atingiram resistências elevadas para o ambiente de cura misto, o OEC;

- a cura com maior humidade relativa (WCC) foi a que produziu betões com maior módulo de elasticidade, seguida da cura OEC e, por fim, da LCC;

- na resistência à tracção por compressão diametral e no módulo de elasticidade, todas as amassaduras aparentam ter menos perdas de desempenho por percentagem de ARP quando curam em ambientes mais secos (LCC);

- o desgaste por abrasão diminuiu continuamente ao longo da percentagem de substituição de AN por ARP; relativamente à cura, o ambiente OEC conduz sempre a valores de desgaste inferiores aos do WCC, que é sempre

o mais desfavorável deste ponto de vista; entre os ambientes LCC e OEC, não foi possível estabelecer relações mas constatou-se que os betões curados em ambiente LCC foram os que mais beneficiaram com introdução de ARP e, com os expostos ao regime WCC, aconteceu o contrário.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos do Laboratório de Construção e Resistência de Materiais do IST, Sr. Leonel Silva, Sr. Fernando Costa, Sr. Fernando Alves e Sr. João Lopes e aos colegas investigadores Rui Silva, José Saraiva Lima e Luís Evangelista, pela importante colaboração e disponibilidade durante o trabalho experimental. Agradecem ainda ao ICIST (Instituto de Engenharia de Estruturas, território e Construção), ao IST, à Universidade Técnica de Lisboa e à FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).

7. REFERÊNCIAS

Albano C., Camacho N., Hernandez M., Matheus A., Gutierrez A., 2009. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behaviour at different w/c ratios. *Waste Management* 29 (10), 2707–2716.

Al-Salem, S., Lettieri, P., Baeyens, J., 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* 29 (10), 2625-2643.

Atis, C. D., 2002. High volume fly ash abrasion resistant concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14 (3) 274–277.

Atis, C. D., Ozcan, F., Kılıç, A., Karahan, O., Bilim, C., Severcan, M. H., 2005. Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. *Building and Environment* 40 (12), 1678-1683.

Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., Irassar, E., 2000. Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement and Concrete Research* 30 (5), 703-708.

Chen, B., Liu, J., 2007. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. *Construction and Building Materials* 21 (1), 7–11.

Choi, Y. W., Moon D. J., Chung J. S., Cho S. K., 2005. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 35 (4), 776-781.

Coutinho, A. S., 1988. Fabrico e propriedades do betão, Vol. I, II, III - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Elzafraney, M., Soroushian, P., Deru, M., 2005. Development of energy-efficient concrete buildings using recycled plastic aggregates, *Journal of Architectural Engineering* 11 (4), 122-130.

Fonseca, N., Brito, J. de, Evangelista, L., 2011. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* 33 (6), 637-643.

Fraj A. B., Kismi M., Mounanga P., 2010. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 24 (6), 1069–1077.

Frigione, M., 2010. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste Management* 30 (6), 1101-1106.

Güneyisi, E., Özturan, T., Gesoğlu, M., 2005. A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions. *Cement & Concrete Composites* 27 (4), 449–461.

Hannawi K., S. Kamali-Bernard S., Prince W., 2010. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management* 30 (11), 2312-2320.

Iadav, I., 2008. Laboratory investigations of the properties of concrete containing recycled plastic aggregates, Civil Engineering Department, Thapar University, Patiala, India.

Ismail, Z., Al-Hashmi, E., 2008. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management* 28 (11), 2041-2047.

Kim, J. K., Moon, Y. H., Eo, S. H., 1988. Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature. *Cement and Concrete Research* 28 (12), 1761–1773.

Kou, S., Lee, G., Poon, C.S., Lai, W.L., 2009. Properties of lightweight aggregate

concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Management* 29 (2), 621-628.

Li H., Zhang M., Ou J., (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260 (11-12) 1262–1266.

Ling, I.H., Teo, D.C.L., 2011. Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing conditions. *Construction and Building Materials* 25 (8), 3648-3655.

Lopes, A. R. G., 2010. *Eco-concrete: betão fabricado com resíduos sólidos industriais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Naik T. R., Singh S. S., Hossain M. M., (1994). Abrasion resistance of concrete as influenced by inclusion of fly ash. *Cement and Concrete Research* 24 (2), 303–312.

Neville, A. M., 1983. *Properties of concrete*, Longman Scientific & Technical, UK.

Ohama Y., 1995. *Handbook of polymer-modified concrete and mortars*. Noyes publications, 77–81, USA.

Ramezianpour, A. A., Malhotra, V. M., 1995. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration

and porosity of concrete incorporation slag, fly ash or silica fume, *Cement & Concrete Composites* 80 (1), 125-133.

Saikia, N.; Brito, J. de, 2011. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregates. *Cement and Concrete Composites* (submetido para publicação).

Soroushian, P., Plasencia, J., Ravabanksh, S., 2003. Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. *ACI Materials Journal* 100 (3), 203-207.

Türkmen, İ., Kantarcı, A., 2007. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Building and Environment* 42 (6), 2378–2383.

Websites:

Instituto Nacional de Estatística: www.ine.pt (visitado a 6/10/2010)

Central Pollution Control Board - Ministry of Environment & Forests (India): http://cpcb.nic.in/Plastic_waste.php (Visitado a 12/09/2011)