

Betões de elevado desempenho com nano-partículas de TiO₂ e cinzas volantes: Resistência mecânica, durabilidade e custo

Tiago Martins^{1†}, José Barroso de Aguiar², Carlos Manuel Gonçalves Jesus³

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

Fernando Pacheco Torgal⁴

Universidade do Minho, Unidade de Investigação C-TAC, Guimarães, Portugal

RESUMO

Os betões de elevado desempenho apresentam vantagens várias sobre os betões correntes nomeadamente elevada resistência e durabilidade. Estes materiais permitem a execução de estruturas com menor quantidade de aço e com uma vida útil superior, fatores cruciais para a eco-eficiência daquelas. Apesar disso as publicações sobre betões com nano-partículas são escassas, representando apenas 1% do total de publicações em revista internacional sobre estes materiais. As publicações sobre betões de elevado desempenho com nano-partículas são ainda mais reduzidas.

O presente artigo apresenta resultados de uma investigação experimental sobre a resistência mecânica e a durabilidade de betões de elevado desempenho contendo nano-partículas de TiO₂ e cinzas volantes. Os parâmetros de durabilidade foram avaliados com recurso a ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, ensaios de ultra-sons, resistividade elétrica, difusão de cloretos e resistência ao ataque químico.

Os resultados mostram que betões com um teor crescente de nano-partículas de TiO₂ evidenciam uma redução da durabilidade. Mostram também que betões com 1% de nano-partículas de TiO₂ e substituição parcial de cimento Portland por 30% de cinzas volantes apresentam uma elevada resistência mecânica (C55/C67) a par de uma elevada durabilidade. Contudo as nano-partículas de TiO₂ agravam de forma muito significativa o custo dos betões.

1. INTRODUÇÃO

A expressão “betão de elevado desempenho” foi definida pela primeira vez em 1980 pelo Professor Roger Lacroix e pelo Professor Pierre-Claude Aitcin (1998) contudo atualmente apenas uma pequena parte da produção de betão se enquadra naquela definição.

¹ Mestre em Engenharia Civil

[†] Autor para correspondência (a54290@alunos.uminho.pt)

² Professor Associado com Agregação

³ Mestre em Engenharia Civil

⁴ Doutor em Engenharia Civil

De acordo com as estatísticas da European Ready Mixed Concrete Organisatio-ERMCO (2013) a produção de betão pronto centra-se esmagadoramente nas classes de resistência C25/30 e C30/37. Apenas 11% respeitam a classes de resistência elevada. Estes números são paradoxais face às poupanças de aço associadas aos betões de resistência elevada, que segundo alguns autores (Hegger et al., 1997) podem atingir quase 50%.

Por outro lado a utilização de betões correntes leva à execução de estruturas menos duráveis que posteriormente irão necessitar de operações de manutenção e ou reparação. Não admira por isso que o número atual de estruturas de betão degradadas seja muito elevado, pois foram construídas quando a durabilidade não constituía uma preocupação dos investigadores e muito menos das empresas de construção (Hollaway, 2011). Estima-se que reabilitação de infra-estruturas degradadas implica a nível mundial gastos na ordem dos 10 triliões de dólares (Pacheco Torgal, 2012).

A nanotecnologia envolve o estudo a uma escala microscópica ($1\text{nm}= 1\times 10^{-9}\text{m}$). A utilização de nano-partículas para aumentar a resistência e a durabilidade de compósitos cimentícios já era mencionada no relatório RILEM TC 197-NCM (Pacheco-Torgal e Jalali, 2011) como sendo uma área de elevado potencial. Apesar disso as publicações sobre betões com nano-partículas são escassas, representando apenas 1% do total de publicações sobre estes materiais, em revista internacional referenciada na base Scopus. As publicações sobre betões de elevado desempenho com nano-partículas são ainda mais reduzidas (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Por outro lado importa levar em linha de conta que a substituição parcial de cimento Portland por subprodutos como as cinzas volantes permite reduzir os impactos ambientais do betão. Contudo as cinzas volantes caracterizam-se por serem uma pozolana pouco reactiva fazendo com que os betões que as contenham apresentem resistências pouco apreciáveis nas primeiras idades de cura (Boukni et al., 2009). Alguns autores (Pacheco-Torgal et al., 2011) constataram uma perda da resistência à compressão aos 28 dias de quase 40% para betões com substituição parcial de cimento Portland por 30% de cinzas volantes. Como as nano-partículas possuem elevada reactividade química apresentam potencial para ultrapassar as limitações de reactividade associadas às cinzas volantes justificando investigações nesta área. O presente artigo surge nessa sequência apresentando resultados de uma investigação experimental destinada a avaliar a resistência mecânica e a durabilidade de betões de elevado desempenho contendo nano-partículas de TiO_2 e cinzas volantes. No mesmo inclui-se também uma análise da influência das nano-partículas de TiO_2 no custo dos betões, aspecto que está totalmente ausente na literatura relativa aos betões com nano-partículas.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais, composição e fabrico dos betões

As características dos agregados utilizados no fabrico dos betões são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos agregados

Agregado	Dmáx (mm)	Massa volúmica (kg/m^3)	Absorção de água (%)
0/4	4	2660	0.20
0/8	8	2620	0.60

Utilizou-se um cimento Portland CEM I 42.5 fornecido pela Companhia Geral de Cal e Cimento, SA. As cinzas volantes fornecidas pela Endesa Generation SA pertencem à classe B e apresentam um módulo de finura da classe N. Utilizou-se um superplastificante de

segunda geração com a referência Glenium Sky 617 em diferentes percentagens, relativamente à massa do cimento, por forma a manter um abaixamento correspondente à classe S3.

As nano-partículas de TiO_2 foram fornecidas pela Evonix industries com a referência P25. As mesmas foram usadas em três percentagens (1%, 2%, 3%) por massa de cimento Portland. As nano-partículas de TiO_2 apresentam um tamanho médio de 21nm e uma superfície específica de $50 \text{ m}^2/\text{g}$. Algumas investigações mostraram que a utilização de nano-partículas pode levar ao aparecimento de sintomas similares aos causados pela exposição a fibras de amianto (Pacheco-Torgal et al., 2012). O manuseamento de nano-partículas requer por isso alguns cuidados como seja o uso de luvas e máscara. As nano-partículas de TiO_2 foram misturadas previamente com o cimento Portland durante 5 minutos com o propósito de aumentar a sua dispersão.

Recorrendo ao método de Faury foram estudadas várias composições de betão com uma razão água/ligante igual a 0.35 e uma quantidade de ligante de $500\text{kg}/\text{m}^3$. Numa primeira fase estudou-se a resistência à compressão de três composições com teores crescentes de nano-partículas de TiO_2 . Seguidamente utilizou-se a composição com o melhor desempenho mecânico para analisar a influência das nano-partículas de TiO_2 na substituição de cimento Portland por 30% de cinzas volantes. As várias composições são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição do betão por m^3

Composição	Cimento (Kg/m^3)	TiO_2 (Kg/m^3)	Cinzas Volantes (Kg/m^3)	Areia (Kg/m^3)	Brita (Kg/m^3)	Superplastificante (L/m^3)	Água (L/m^3)
BR	500	-	-	852	823	10	182
B 1% TiO_2	496	4.1	-	765	848	10	182
B 2% TiO_2	491	9.4	-	601	889	10	182
B 3% TiO_2	484	15.6	-	453	915	10	182
B 30% CV	350	-	150	809	852	10	169
B 30% CV + 1% TiO_2	346	4.4	150	698	882	10	169

Tabela 3 - Custo dos materiais

Cimento ($\text{€}/\text{Kg}$)	TiO_2 ($\text{€}/\text{Kg}$)	Cinza Volante ($\text{€}/\text{Kg}$)	Areia ($\text{€}/\text{Kg}$)	Brita ($\text{€}/\text{Kg}$)	Superplastificante ($\text{€}/\text{L}$)	Água ($\text{€}/\text{L}$)
0.1	25.6	0.03	0.008	0.007	0.82	0.1

Na Tabela 3 são apresentados os custos dos materiais (sem IVA) que permitiram calcular a variação percentual do custo das diversas composições a qual é apresentada na Figura 1. Os resultados mostram que o uso de nano-partículas de TiO_2 mesmo numa percentagem de 1% é responsável por um agravamento muito substancial do custo betão. Mesmo a substituição de 30% de cimento Portland por cinzas volantes permite apenas uma ligeira redução do agravamento do custo de 118% para 112%. Tal mostra que a viabilidade económica dos betões com nano-partículas de TiO_2 está dependente de uma eventual redução substancial do custo das mesmas.

Note-se ainda que nestas considerações não se inclui um eventual agravamento de custos associado aos cuidados acrescidos em termos de segurança no trabalho que deve envolver a utilização de nano-partículas ou sequer mesmo um eventual agravamento do custo

do seguro de acidentes de trabalho por via da utilização de substâncias com um certo grau de perigosidade.

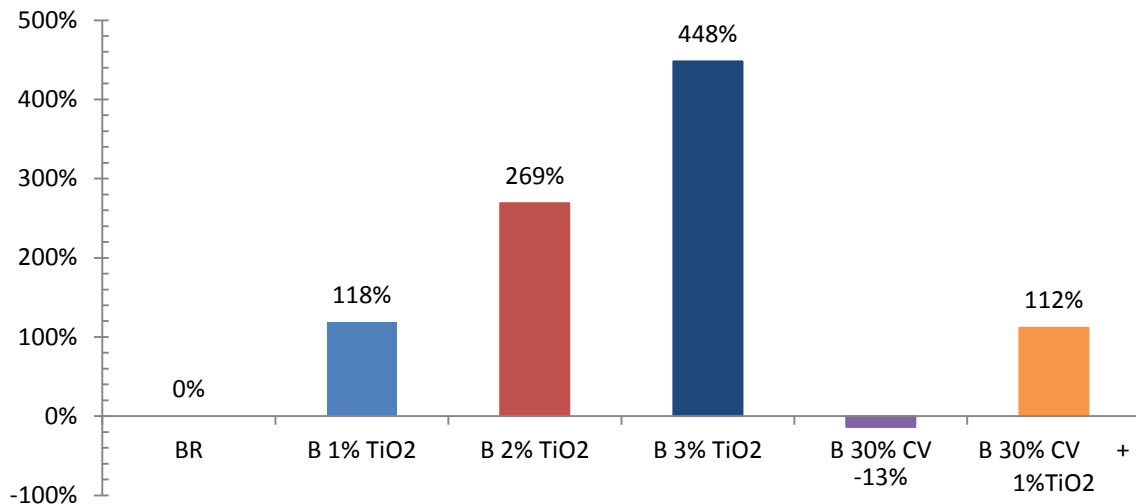


Figura 1 – Variação percentual do custo relativamente ao betão de referência

2.2 Procedimentos experimentais

2.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3:2009. Os provetes foram mantidos em câmara húmida a uma temperatura de 21 ± 2 °C até serem ensaiados. O ensaio foi levado a cabo em provetes de $150 \times 150 \times 150$ mm³. A resistência à compressão foi obtida a partir da média de 3 provetes ensaiados aos 7 e 28 dias de idade.

2.2.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado de acordo com a especificação do LNEC E 394-1993 e envolveu a utilização de provetes de $100 \times 100 \times 100$ mm³ com 28 dias de cura. A absorção de água corresponde à diferença entre a massa dos provetes após imersão e a massa seca dos mesmos provetes. O resultado da absorção de água por imersão resulta da média da absorção obtida em 3 provetes.

2.2.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a especificação do LNEC E 394-1993 e envolveu a utilização de provetes de $100 \times 100 \times 100$ mm³ com 28 dias de cura. Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, são expressos em termos de quantidade de água absorvida por unidade de superfície em contacto com a água em função da raiz quadrada do tempo. A massa da água absorvida em termos capilares pelos provetes foi determinada para 10, 20, 30, 60, 180, 1440 e 4320 minutos. O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi calculado a partir da inclinação da recta calculada a partir de uma regressão linear.

2.2.4 Velocidade de ultra-sons

A determinação da velocidade de ultra-sons foi baseada na norma NP EN 12504 – 4. Para o efeito utilizaram-se provetes com $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ e a velocidade de propagação dos ultra-sons por transmissão direta foi realizado aos 7 e 28 dias da idade do betão.

2.2.5 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica foi obtida da média de 3 provetes de betão com 7 e 28 dias de idade, cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para esse efeito foi utilizado um aparelho com 4 eléctrodos e sonda Wenner (Polder, 2001). Foram feitas leituras da resistividade em três faces dos provetes, sendo que em cada face se fizeram duas leituras com uma rotação de 180° entre elas, num total de seis leituras por provete.

2.2.6 Difusão de cloretos por migração em regime não estacionário

O ensaio de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário foi baseado na especificação do LNEC E 463. Para o efeito utilizaram-se provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, dos quais se extraíram 3 provetes com apenas 50 mm de altura. Aos provetes foi aplicada uma diferença de potencial de $30 \pm 0,2 \text{ V}$ para provocar a difusão dos iões. Uma das faces do provete é colocada em contacto com uma solução de cloreto de sódio e hidróxido de sódio, enquanto a outra fica em contacto com uma solução de hidróxido de sódio. A profundidade de penetração é medida após sujeição dos provetes a um procedimento de compressão diametral. A superfície fracturada do provete é aspergida com uma solução de nitrato de prata (NO_3Ag), após o que é feita a medição do comprimento da área que mudou de cor. O coeficiente de difusão é calculado com a seguinte equação:

$$D = (RTL/zFU) \cdot [X_d - (\alpha \sqrt{X_d})/t] \quad (1)$$

na qual:

$$\alpha = 2\sqrt{(RTL/zFU)} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - 2c_d/c_o)$$

D: Coeficiente de difusão, m^2/s ;

z: Valência absoluta do ião cloreto, $z = 1$;

F: Constante de Faraday, $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$;

U: Diferença de potencial, V;

R: Constante de gás perfeito, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$;

T: Temperatura da solução, K;

L: Espessura do provete, m;

X_d : Profundidade de penetração, m;

t: Duração do ensaio em segundos;

erf^{-1} : Função de erro inversa;

c_d : Concentração de cloretos que provoca a mudança de cor;

c_o : Concentração de cloretos na solução de cloreto de sódio

2.2.7 Resistência ao ataque químico

O ensaio de resistência ao ataque químico foi baseado na norma ASTM C-267: 2006, tendo-se utilizado uma solução de ácido sulfúrico com uma concentração de 10%. Foram utilizados provetes com $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ e com uma idade de cura de 28 dias. A resistência

ao ataque químico foi avaliada pela diferença de massa antes e depois da imersão em ácido sulfúrico ao fim de 1, 7, 14, 35 e 56 dias.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Resistência à compressão

Na Figura 2 apresenta-se a resistência à compressão das várias composições para os 7 dias e 28 dias de cura. O coeficiente de variação foi inferior a 6%. Os resultados mostram que as composições com substituição parcial de cimento Portland por 1% de nano-partículas de TiO_2 apresentam uma resistência à compressão similar à resistência à compressão do betão de referência, tanto para os 7 dias de cura como para os 28 dias de cura. Pensa-se que este fenómeno esteja relacionado com o efeito de filler da referida substituição.

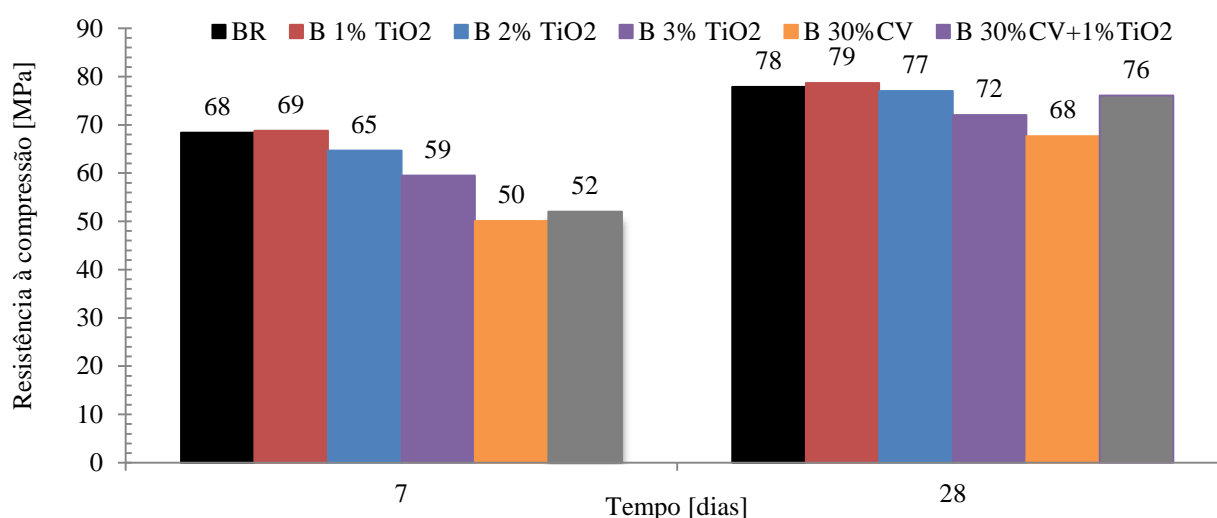


Figura 2 - Resistência à compressão

Verifica-se também que o aumento da percentagem de nano-partículas de TiO_2 é responsável por um decréscimo na resistência à compressão. Tanto para os 7 dias de cura como para os 28 dias de cura. Apesar disso o decréscimo da resistência à compressão é maior em idades iniciais. Tal poderá dever-se a uma dispersão ineficaz das nano-partículas de TiO_2 na matriz cimentícia, como já constatado por outros autores (Nazari e Riahi, 2011).

A utilização de uma percentagem de 1% de nano-partículas de TiO_2 parece corresponder a um valor ótimo, o que confirma resultados de investigações anteriores (Nazari e Riahi, 2011a; Givi et al, 2010; He e Xi, 2008).

Quando comparada com o betão de referência a composição com 3% de nano-partículas de TiO_2 apresenta um decréscimo da resistência à compressão de 13% aos 7 dias de cura, o qual se reduz para 8% aos 28 dias de cura. Tal comportamento parece significar que a hidratação da matriz cimentícia é potenciada pela presença das nano-partículas.

A composição com uma substituição de cimento Portland por 30% de cinzas volantes apresenta uma perda da resistência à compressão de quase 30% para os 7 dias de cura. Isto confirma a reduzida contribuição das cinzas volantes para a resistência à compressão em idades iniciais.

Os resultados mostram ainda que a presença das nano-partículas de TiO_2 contribui para minimizar a perda de resistência provocada pelas cinzas volantes mas apenas para a

idade de cura de 28 dias. Em idades iniciais a contribuição daquelas para a resistência à compressão da composição com cinzas volantes é praticamente nula.

3.2 Absorção de água por imersão

Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão são apresentados na Figura 3. O coeficiente de variação foi inferior a 8%. Os mesmos mostram que nas composições sem cinzas volantes o aumento da percentagem de nano-partículas de TiO_2 é responsável por um aumento da absorção de água por imersão.

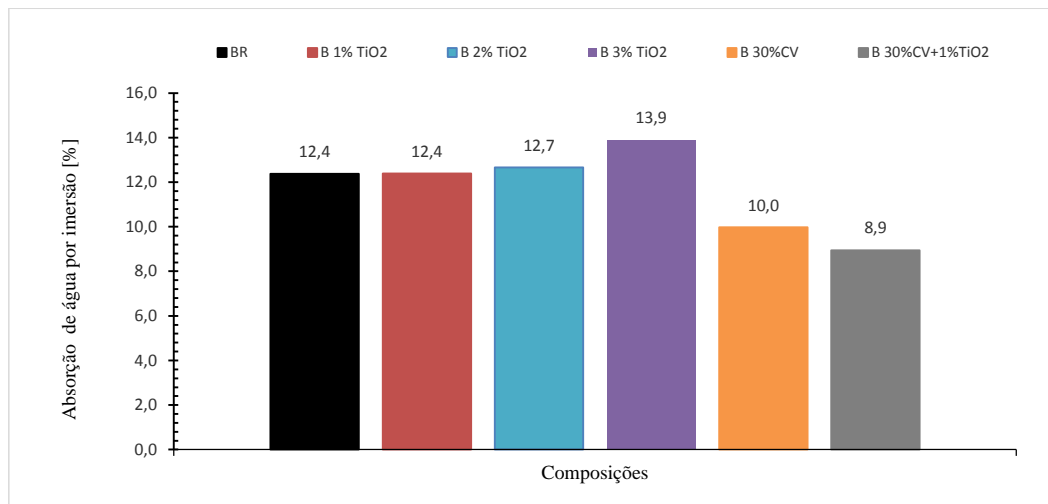


Figura 3 - Absorção de água por imersão

Detectou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.98$) entre a absorção de água por imersão e resistência à compressão aos 28 dias (Figura 4).

Os resultados de outros autores (Zhang e Li, 2011) confirmam os presentes no sentido em que um aumento da percentagem de nano-partículas se traduz numa matriz cimentícia mais porosa.

A composição com uma substituição de cimento Portland por 30% de cinzas volantes apresenta uma redução de aproximadamente 20% na absorção de água. Parte da explicação tem a ver com os 7% de diferença na relação água/ligante das duas composições. Já os restantes 13% podem dever-se à reacção pozolânica que ao consumir $Ca(OH)_2$ gerando compostos CSH torna a microestrutura mais densa. A composição com 30% de cinzas volantes e 1% de nano-partículas de TiO_2 evidencia uma absorção de água ainda menor que poderá ter resultado da potenciação da reacção pozolânica.

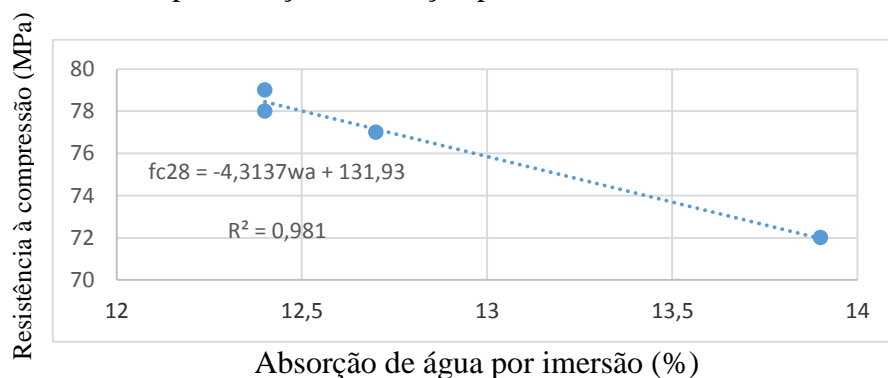


Figura 4 - Correlação entre a resistência à compressão aos 28 dias de cura e a absorção de água por imersão

3.3 Absorção de água por capilaridade

A Figura 5 apresenta os coeficientes de absorção de água por capilaridade. O coeficiente de variação foi inferior a 9%. Os resultados mostram que para as composições sem cinzas volantes a percentagem de nano-partículas de TiO_2 está associada a um aumento da absorção de água por capilaridade. Esta tendência já tinha sido constatada nos resultados do ensaio de absorção de água. Tal parece significar que a utilização de 3% de nano-partículas de TiO_2 gera uma microestrutura com elevadas características capilares.

Outras investigações (Azevedo et al, 2012) sobre composições similares (sem nano-partículas) e com a mesma razão água/ligante referem que as composições com 30% de cinzas volantes apresentam um coeficiente de capilaridade mais elevado que a composição de referência. As únicas diferenças residem no tipo de cimento utilizado, do tipo II (percentagem de clínquer entre 65% e 79%) nas primeiras e do tipo I (percentagem de clínquer entre 95% e 100%) na presente investigação.

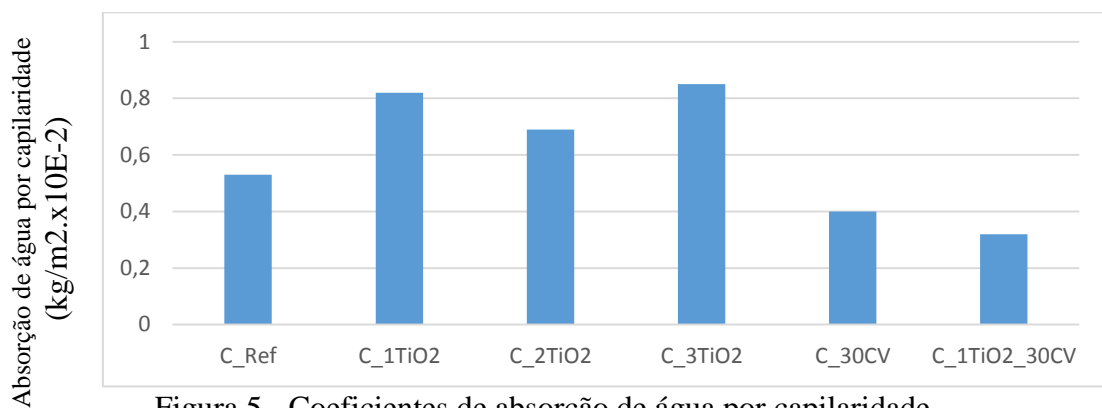


Figura 5 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade

3.4 Velocidade de propagação de ultra-sons

Os resultados relativos à velocidade de propagação de ultra-sons são apresentados na Figura 6. O coeficiente de variação foi inferior a 5%. Aos 7 dias de cura as velocidades são inferiores para todas as composições relativamente aos 28 dias. Este comportamento é idêntico ao observado na resistência à compressão. Detetou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.98$) entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultra-sons (Figura 7).

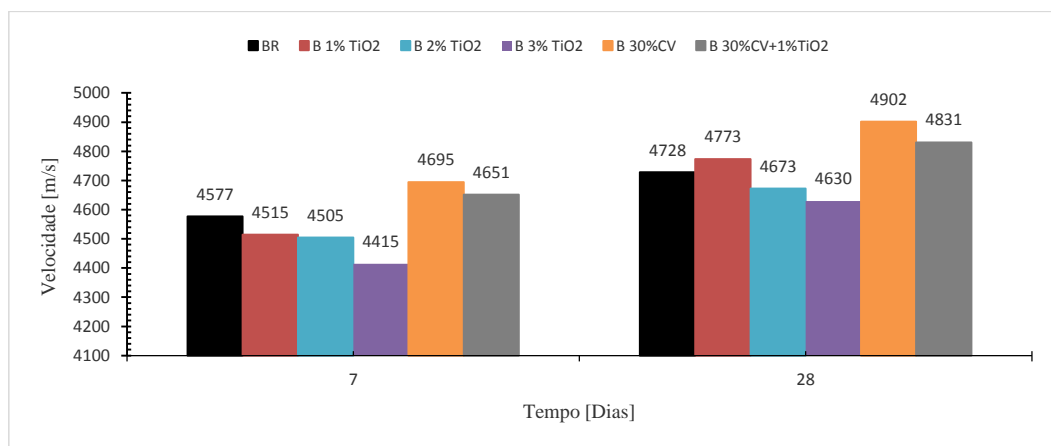


Figura 6 - Velocidade de propagação de ultra-sons para betões com 7 e 28 dias de cura

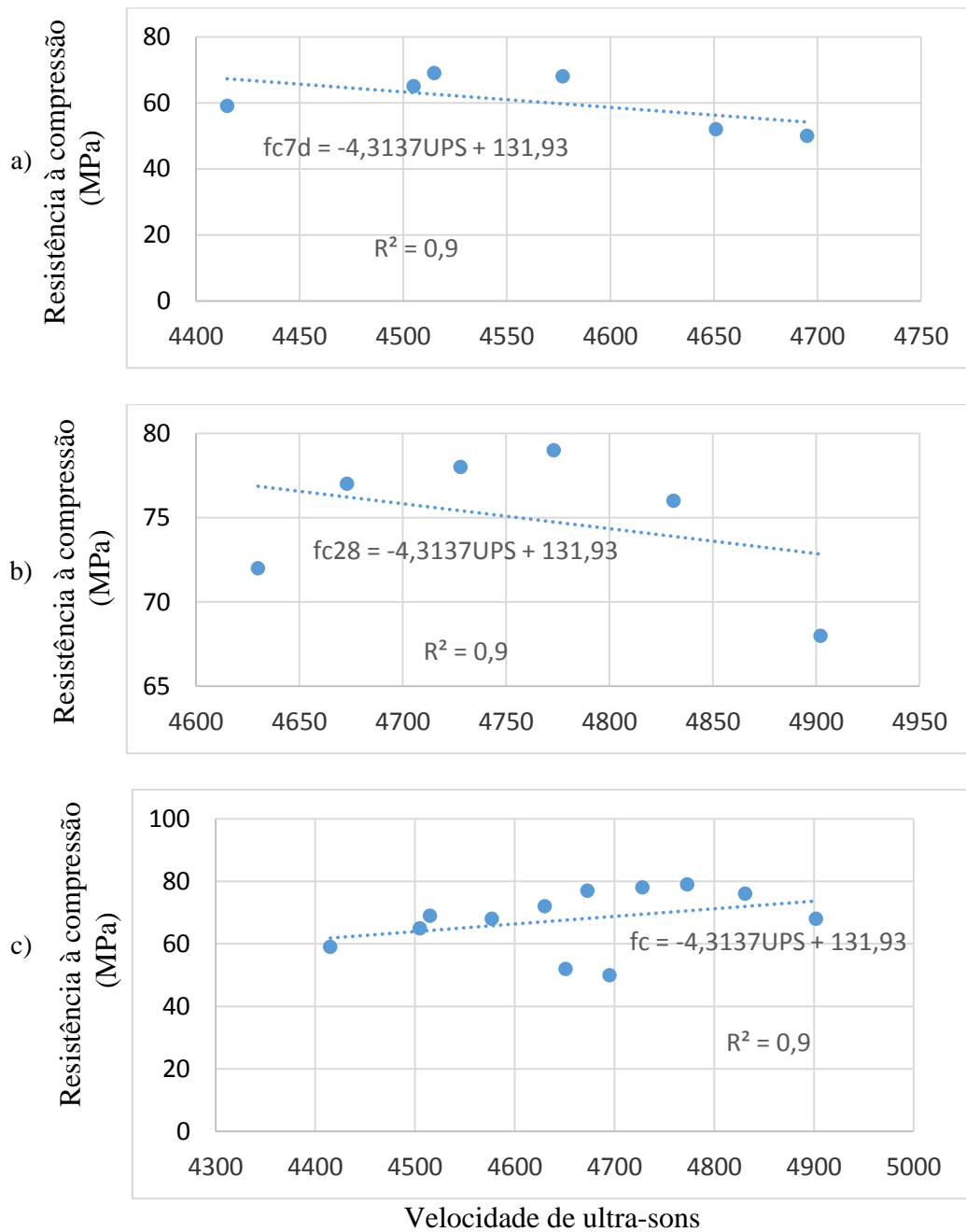


Figura 7 - Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de ultra-sons:
a) Para 7 dias de cura; b) Para 28 dias de cura; c) Ambos os tempos de cura

3.5 Resistividade elétrica

A Figura 8 apresenta os resultados da resistividade elétrica. O coeficiente de variação foi inferior a 8%. Aos 7 dias de cura todas as composições apresentam valores de resistividade inferiores à da composição de referência. Ainda assim o risco de corrosão de acordo com o CEB 192 (Tabela 4) para todas as composições com 7 dias de cura fica abaixo do patamar de risco elevado. A resistividade dos betões com cinzas volantes e 28 dias de cura supera a do betão de referência. Para esta idade de cura todas as composições apresentam um baixo risco de corrosão. A composição com 30% de cinzas volantes e 1% de nano-partículas de TiO_2 evidencia um risco de corrosão muito baixo. Como a resistividade elétrica é um dos principais parâmetros responsáveis pela iniciação e propagação da corrosão das armaduras

(Ozkan e Gjorv, 2008) isso significa que a composição atrás referida constitui uma melhor opção em termos de durabilidade.

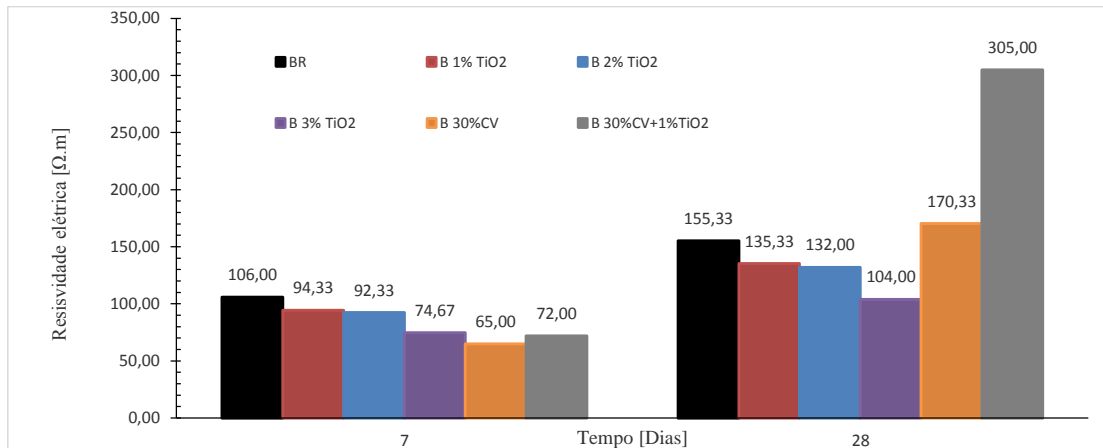


Figura 8 - Resultados da resistividade elétrica de todas as composições

Tabela 4 - Risco de corrosão de acordo com a resistividade do betão (CEB, 1989)

Resistividade do betão [Ω.m]	Risco de corrosão
<50	Muito alto
50-100	Alto
100-200	Baixo
>200	Muito baixo

3.6 Difusão de cloretos

Os resultados da difusão de cloretos são apresentados na Figura 9. O desvio padrão foi inferior a 6%. Com exceção da composição com 3% de nano-partículas de TiO_2 que evidencia uma resistência moderada em termos da resistência à penetração de cloretos (Tabela 5) todas as restantes composições apresentam uma resistência elevada. A composição com 30% de cinzas volantes e 1% de nano-partículas de TiO_2 evidencia uma resistência muito elevada. Detetou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.9$) entre a difusão de cloretos e a resistividade elétrica (Figura 10) conformando resultados de outros autores (Camões, 2002; Gjorv, 2003).

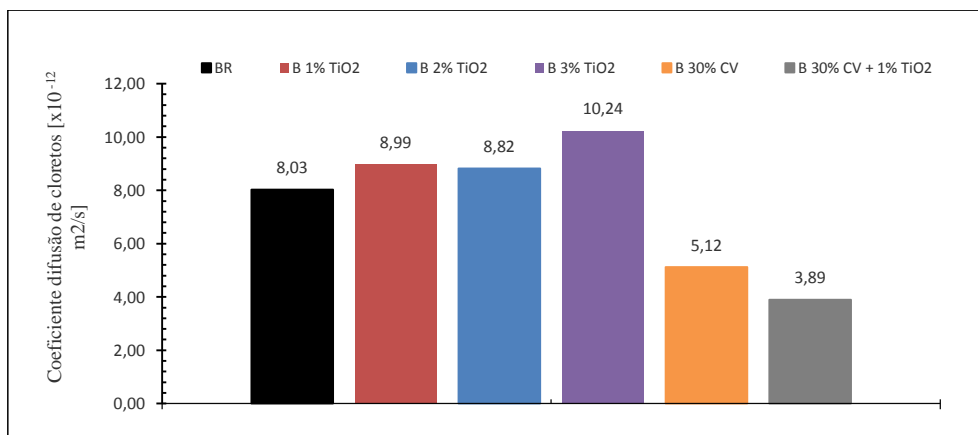


Figura 9 - Difusão de cloretos

Tabela 5 - Resistência à penetração de cloretos (Gjorv, 1996)

D_{NSM} [$\times 10^{-12} m^2/s$]	Resistência do betão à penetração de cloretos
>15	reduzida
10 -15	moderada
5 -10	elevada
2,5-5	muito elevada
<2,5	ultra elevada

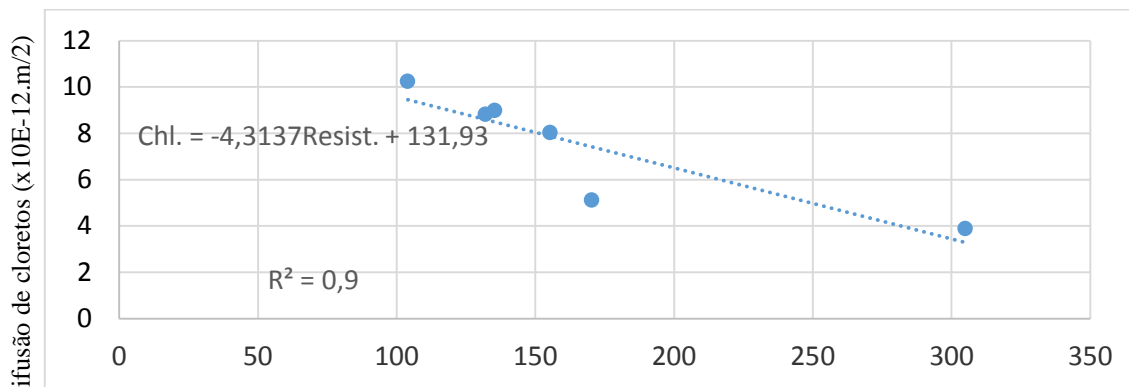


Figura 10 - Correlação entre a difusão de cloretos e a resistividade eléctrica

3.7 Resistência ao ataque químico

A Figura 11 apresenta os resultados da resistência ao ataque químico. O desvio padrão foi inferior a 7%. Pode constatar-se que até aos 7 dias de exposição ao ácido sulfúrico não se notam diferenças assinaláveis entre as diversas composições. As mesmas continuam a ser mínimas ao fim de 14 dias e somente ao fim de 35 dias começam a evidenciar-se. As composições contendo cinzas volantes apresentam as maiores perdas de massa após exposição ao ácido sulfúrico. As composições com 2% e 3% de nano-partículas de TiO_2 apresentam melhor comportamento que o das composições com cinzas volantes, contudo ainda assim inferior à composição de referência. Somente a composição com 1% de nano-partículas de TiO_2 apresenta melhor comportamento que aquela. Estes resultados estão em linha com o desempenho em termos da resistência à compressão. O desempenho referido mantém-se inalterado ao fim de 56 dias.

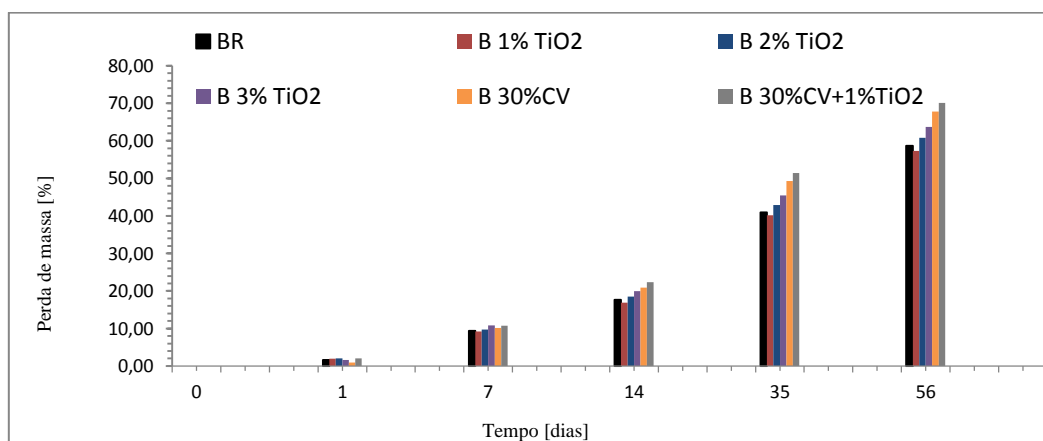


Figura 11 – Perda de massa após imersão em ácido sulfúrico

4. CONCLUSÕES

Os resultados da presente investigação permitem salientar as seguintes conclusões:

A utilização de 1% de nano-partículas de TiO₂ parece ser (relativamente às percentagens estudadas) uma percentagem ótima em termos da resistência à compressão.

A utilização de nano-partículas de TiO₂ minimiza os decréscimos de resistência à compressão aos 28 dias de cura provocados pelas cinzas volantes.

Nas composições sem cinzas volantes o aumento da percentagem de nano-partículas de TiO₂ traduz-se num aumento da absorção de água.

Detetou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.98$) entre a absorção de água e a resistência à compressão aos 28 dias de cura.

Detetou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.98$) entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultra-sons.

Detetou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.9$) entre a difusão de cloretos e a resistividade elétrica.

As composições contendo cinzas volantes apresentam as maiores perdas de massa após exposição ao ácido sulfúrico.

A utilização de 1% de nano-partículas de TiO₂ parece ser (relativamente às percentagens estudadas) uma percentagem ótima em termos da resistência ao ataque químico.

Os resultados relativos ao custo dos betões mostram que o uso de nano-partículas de TiO₂ mesmo numa percentagem de apenas 1% é responsável por um agravamento muito substancial do custo betão.

A viabilidade económica dos betões com nano-partículas de TiO₂ está dependente de uma eventual redução substancial do custo daquelas.

Torna-se necessário avaliar se a utilização de nano-partículas poderá ter custos acrescidos por via das suas implicações em termos da segurança no trabalho.

REFERÊNCIAS

Aïtcin, P.-C.: High-Performance Concrete. E & FN Spon, an imprint of Routledge 11 New Fetter Lane, London (1998)

Azevedo, F.; Pacheco-Torgal, F.; Jesus, C.; Barroso de Aguiar, J.L., Properties and durability of HPC with tyre rubber waste. *Construction and Building Materials*, **34**, 186-191 (2012).

Boukni, A.; Swamy, R.; Bali, A., Durability properties of containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Materials*, **23**, 2836-2845 (2009).

Buzea, C., Toxicity of nanoparticles. In Toxicity of building materials. Edited by F.Pacheco Torgal, S. Jalali and A. Fucic, WoodHead Publishing Ltd, Cambridge, UK (2012)

Camões, A., Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho (2002).

CEB, European Concrete Committee, Diagnosis and assessment of concrete structures – State of the art report, CEB Bulletin d'information n° 192, Lausanne, 1989.

ERMCO: Statistics of the year 2012. Boulevard du Souverain, **68**, B-1170 Brussels, Belgium (2013)

Givi, A.; Rashid, S.; Aziz, F.; Salleh, M., Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites: Part B*, **41**, 673–677 (2010).

Gjørsv, O., Performance and serviceability of concrete structures in the marine environment”, Proceedings, Odd E. Gjørsv Symposium on Concrete for Marine Structures, Ed. por P.K. Mehta, CANMET/ACI, 259-279 (1996).

Gjørsv, O., Durability of concrete structures and performance-based quality control, Proceedings, International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium – A New Area of Building, Ed. por Amr S. El-Dieb, Mahmoud M. Reda Taha and Shelly L. Lissel, Ain Shams University, Cairo, (2003).

He, X.; Shi, X., Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2070, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 13–21 (2008).

Hegger, J.; Nitsch, A.; Burkhardt, J., Hchleistungsbeton im Fertigteilbau. Betonwerk Fertigteil – Technik, **2**, 81-90 (1997)

Hollaway, L.C. In: Key issues in the use of fibre reinforced polymer (FRP) composites in the rehabilitation and retrofitting of concrete structure. Edited by Karbhari VM & Lee LS, Service life estimation and extension of civil engineering structures. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge (2011)

LNEC E 463. Betões: Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa (2004)

NP EN 12390-3:2009, Ensaios de betão endurecido. Resistência à compressão dos provetes. Lisboa

NP EN 206-1: Betão-Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa (2007)

LNEC E393. Betões: Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade, Lisboa (1993).

NP EN 12504-4. Ensaios do betão em estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Lisboa (2007)

Nazari, A.; Riahi, S., The effects of zinc dioxide nanoparticles on flexural strength of self-compacting concrete. *Composites: Part B*, **42**, 167–75 (2011)

Nazari, A.; Riahi, S., Al₂O₃ nanoparticles in concrete and different curing media. *Energy and Buildings*, **43**, 1480–1488 (2011).

Ozkan, S.; Gjørsv, O. Electrical resistivity measurements for the quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal*, **105**, 541-547 (2008).

Pacheco-Torgal, F., Execução e reparação de infra-estruturas com betões correntes ou o barato sai caro (em termos económicos e ambientais). *Revista Maquinaria – Angola*, **227**, 56-62 (2012)

Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S., Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of building materials. *Construction and Building Materials*, **25**, 582-590 (2011).

Pacheco-Torgal, F.; Miraldo, S.; Ding, Y.; Labrincha, J., Targeting HPC with the help of nanoparticles: An overview. *Construction and Building Materials*, **38**, 356-370 (2013).

Pacheco-Torgal, F.; Shasavandi, A.; Jalali, S., Using metakaolin to improve the compressive strength and the durability of fly ash based concrete. International Conference on Innovation and Valorisation in Civil Engineering and Construction Materials- INVACO2, Rabat, Morocco (2011).

Polder, R.: Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete – A RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, **15**, 125-131 (2001).

Zhang, M.-H.; Li, H., Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. *Construction and Building Materials*, **25**, 608–616 (2011).