

Utilização de nano-partículas para a obtenção de betões de elevado desempenho

MARTINS T.^{1,a}, PACHECO-TORGAL F.^{2,b}, AGUIAR J.B.^{2,c}, JESUS C.^{2,d}

¹Dep. de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

²C-TAC, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^aa54290@alunos.uminho.pt, ^btorgal@civil.uminho.pt, ^caguiar@civil.uminho.pt,
^dcjesus@civil.uminho.pt

Palavras-chave: TiO₂, betões de elevado desempenho, resistência à compressão, absorção de água, resistência ao ataque químico.

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 ecoeficiência daquelas. Apesar disso as publicações sobre betões com nano-partículas são escassas, representando apenas 1% do total de publicações 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, ensaio 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. Os resultados mostram também que betões com 1% 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. Os resultados permitiram ainda detetar várias correlações estatisticamente significativas.

Introdução

A expressão “betão de elevado desempenho” foi definida pela primeira vez em 1980 pelo Professor Roger Lacroix e pelo Professor Pierre-Claude Aitcin [1] contudo atualmente apenas uma pequena parte da produção de betão se enquadra naquela definição. De acordo com as estatísticas da ERMCO [2] 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 podem atingir quase 50% [3]. 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 [4]. Estima-se que reabilitação de infraestruturas degradadas implica a nível mundial gastos na ordem dos 10 triliões de dólares [5]. A nanotecnologia envolve o estudo a uma escala microscópica (1nm= 1×10⁻⁹m). A utilização de nano-partículas para aumentar a resistência e a durabilidade de compósitos cimentícios já era mencionada no relatório RILEM TC 197-NCM [6] 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. As publicações sobre betões de elevado

desempenho com nano-partículas são ainda mais reduzidas [7]. 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 reativa fazendo com que os betões que as contenham apresentem resistências pouco apreciáveis nas primeiras idades de cura [8]. Alguns autores [9] 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 apresentam uma elevada reatividade química apresentam potencial para ultrapassar as limitações de reatividade associadas às cinzas volantes justificando investigações nesta área.

Trabalho experimental

Materiais, composição e fabrico dos betões. As características dos agregados utilizados no fabrico dos betões são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 7: Características dos agregados

| Agregado | D _{máx} (mm) | Massa volúmica (kg/m ³) | Absorção de água (%) |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 0/4 | 4 | 2660 | 0.20 |
| 0/8 | 8 | 2620 | 0.60 |

Foi utilizado 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 por forma a manter um abaixamento correspondente à classe S3. As nano-partículas de TiO₂ foram fornecidas pela Evonix industries com a referência P25, tendo sido usadas em três percentagens (1%, 2%, 3%) por massa de cimento Portland. As nano-partículas de TiO₂ apresentam um tamanho médio de 21nm e uma superfície específica de 50 m²/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 [10]. O manuseamento de nano-partículas requer por isso alguns cuidados como seja o uso de luvas e máscara. As nano-partículas de TiO₂ 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 500kg/m³. Numa primeira fase estudou-se a resistência à compressão de três composições com teores crescentes de nano-partículas de TiO₂. Seguidamente utilizou-se a composição com o melhor desempenho mecânico para analisar a influência das nano-partículas de TiO₂ na substituição de cimento Portland por 30% de cinzas volantes. As várias composições são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Composição dos betões

| Composição | Cimento (Kg/m ³) | TiO ₂ (Kg/m ³) | Cinza Volante (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 |

Trabalho experimental

Resistência à compressão. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 206-1 [11]. Os provetes foram mantidos numa 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.

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 [12] 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.

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 [13] 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.

Velocidade de ultra-sons. A determinação da velocidade de ultra-sons foi baseada na norma NP EN 12504 – 4 [14]. Para o efeito utilizaram-se provetes com $100 \times 100 \times 100$ mm³ e a velocidade de propagação dos ultra-sons por transmissão direta foi realizado aos 7 e 28 dias da idade do betão.

Resistividade elétrica. A resistividade elétrica foi obtida da média de 3 provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, utilizando um aparelho com 4 elétrodos e sonda Wenner [15]. 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.

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 [16]. 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 é aplicada uma diferença de potencial de $30 \pm 0,2$ V no provete que irá provocar a difusão dos iões. Um 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 fraturada do provete é aspergida com uma solução de nitrato de prata (NO₃Ag), 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, m²/s;

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

F: Constante de Faraday, F = 9.648 x 10⁴ J/(V.mol);

U: Diferença de potencial, V;

R: Constante de gás perfeito, R = 8.314 J/(K.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

Resistência ao ataque químico. O ensaio de resistência ao ataque químico foi baseado na norma ASTM C-267: 2006 com recurso a uma solução de ácido sulfúrico com uma concentração de 10%. Utilizaram-se provetes com dimensões $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ 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.

Resultados e discussão

Resistência à compressão. Na Fig. 1 apresenta-se a resistência à compressão das várias composições para os 7 dias e 28 dias de cura. 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. Este fenómeno deverá estar relacionado com o efeito filler da referida substituição. 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 [17]. A utilização de uma percentagem de 1% de nano-partículas de TiO_2 parece corresponder a um valor ótimo, o que comprova resultados de investigações anteriores [18-20]. Quando comparado 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. O que significa 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.

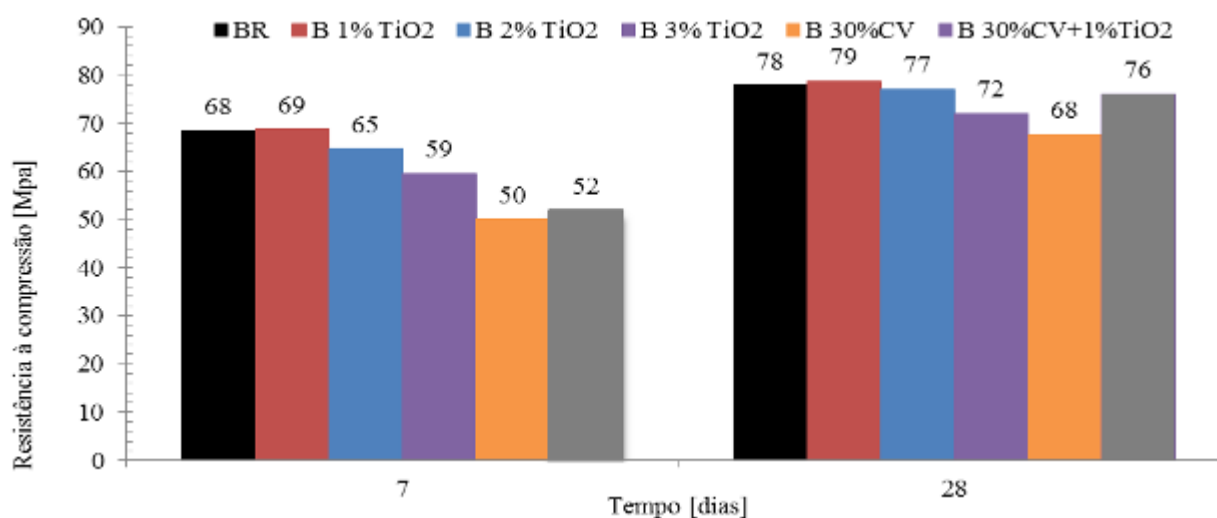


Fig. 1: Resistência à compressão

Absorção de água por imersão. Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão são apresentados na Fig. 2. 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. Detetou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.98$) entre a absorção de

água por imersão e resistência à compressão aos 28 dias (Fig. 3). Os resultados de outros autores [21] 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 que ver com os 7% de diferença na relação água/ligante das duas composições. Já os restantes 23% podem dever-se à reação pozolânica que ao consumir Ca(OH)_2 gerando compostos CSH tornou a microstructura mais densa. A composição com 30% de cinzas volantes e 1% de nano-partículas de TiO_2 evidencia uma absorção de água ainda menor em resultado da potenciação da reação pozolânica.

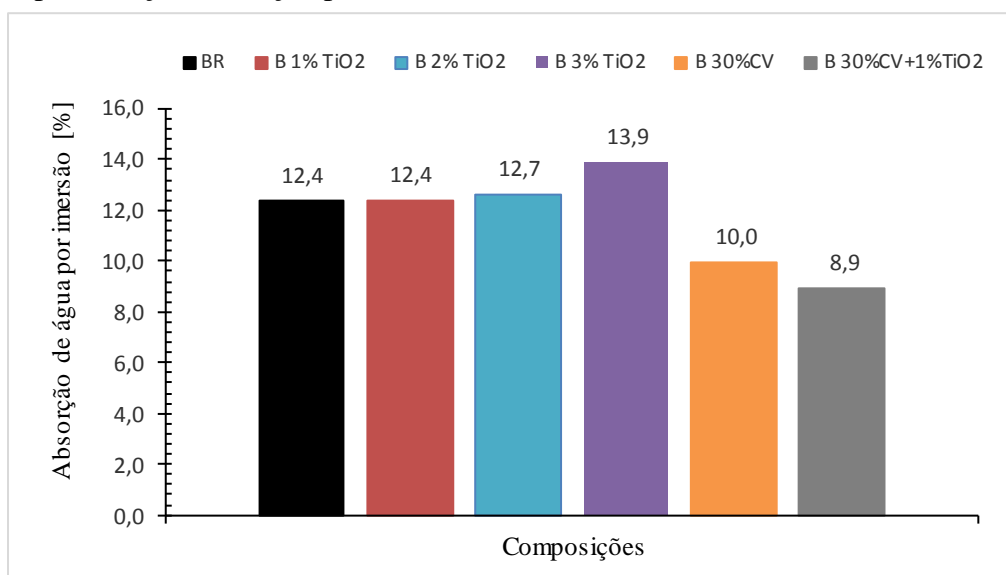


Fig. 2: Resultados da absorção de água por imersão de todas as composições

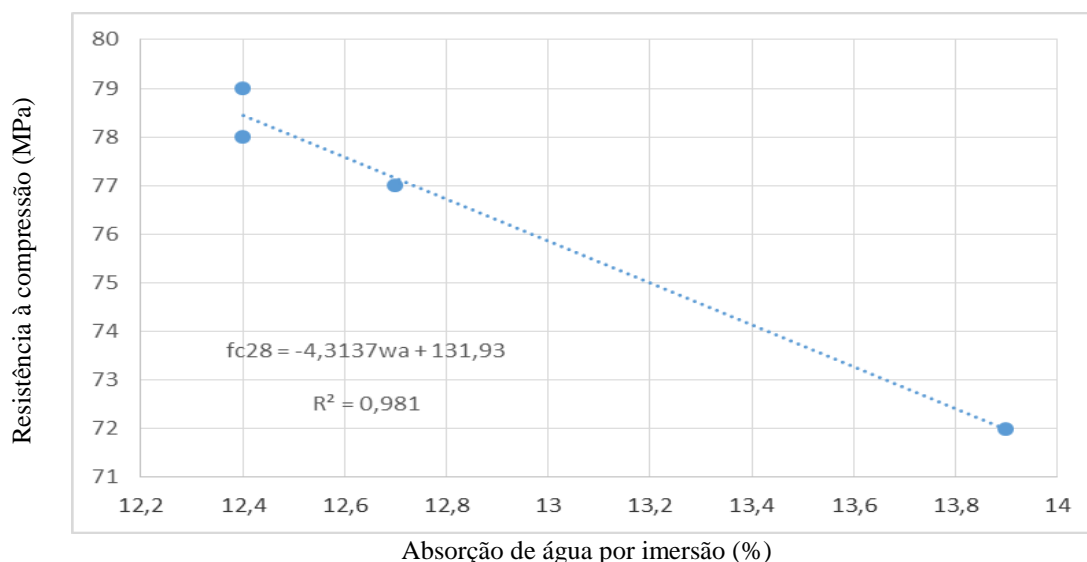


Fig. 3: Correlação entre a resistência à compressão aos 28 dias de cura e a absorção de água por imersão

Absorção de água por capilaridade. A Fig. 4 apresenta os coeficientes de absorção de água por capilaridade. 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. O que parece significar que a utilização de 3% de nano-partículas de TiO_2 gera uma elevada microestrutura de características capilares. Outras investigações [22] sobre composições similares sem nano-partículas 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.

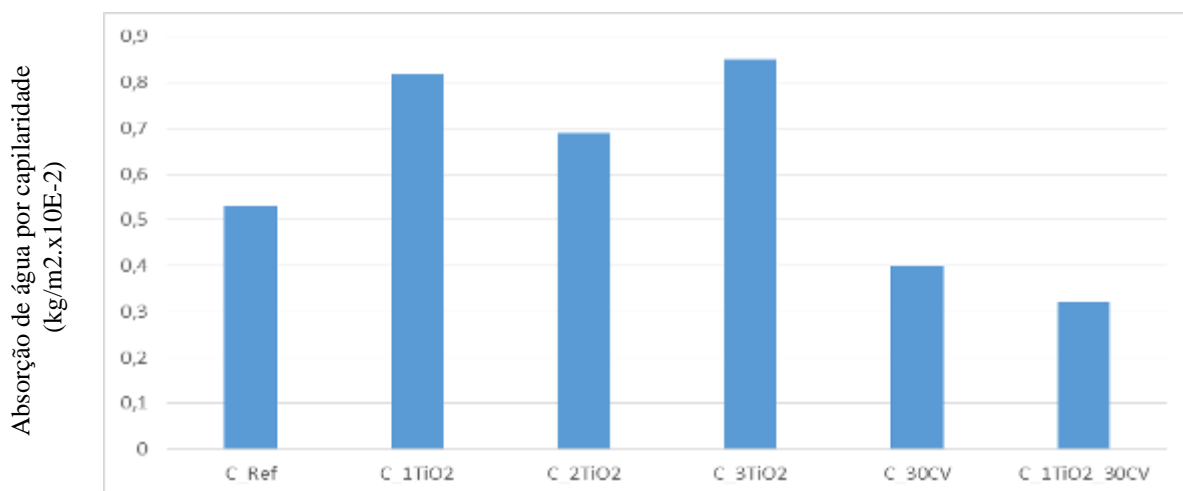


Fig. 4: Coeficientes de absorção de água por capilaridade

Velocidade de ultra-sons. Os resultados relativos à velocidade de propagação de ultra-sons são apresentados na Fig.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. Detectou-se uma correlação estatisticamente significativa ($R^2=0.98$) entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultra-sons (Fig. 6).

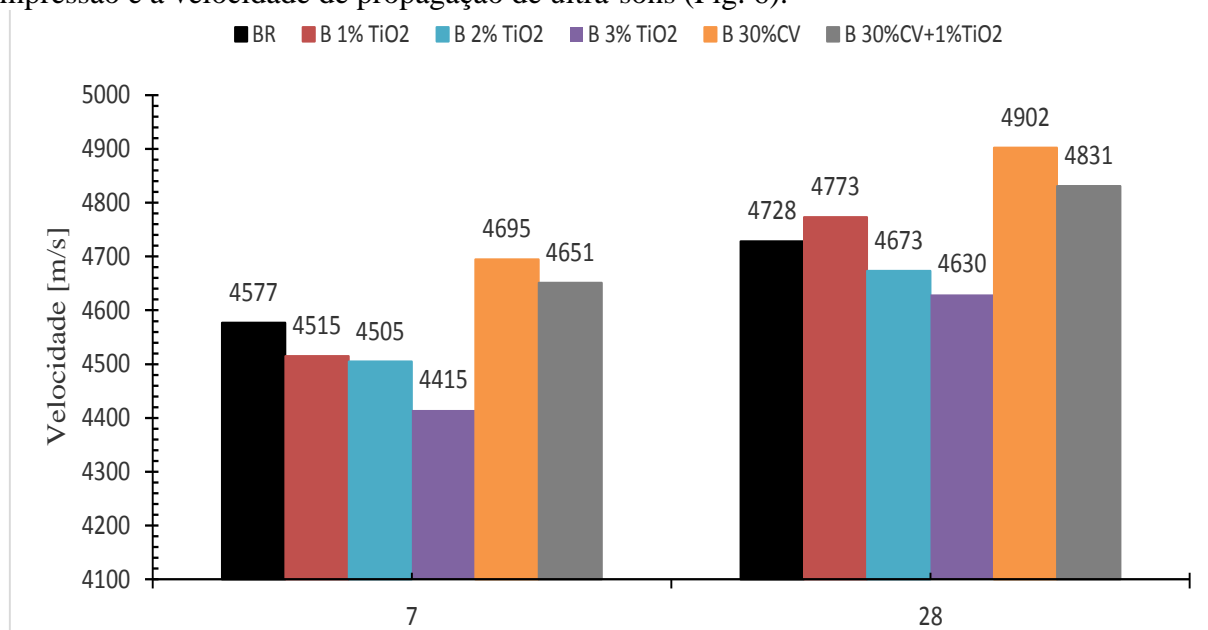


Fig. 5: Velocidade de propagação de ultra-sons para betões com 7 e 28 dias de cura

Resistividade elétrica. A Fig. 7 apresenta os resultados da resistividade elétrica. 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 3) 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 TiO₂ 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 [23] isso significa que a composição atrás referida constitui uma boa opção em termos de durabilidade.

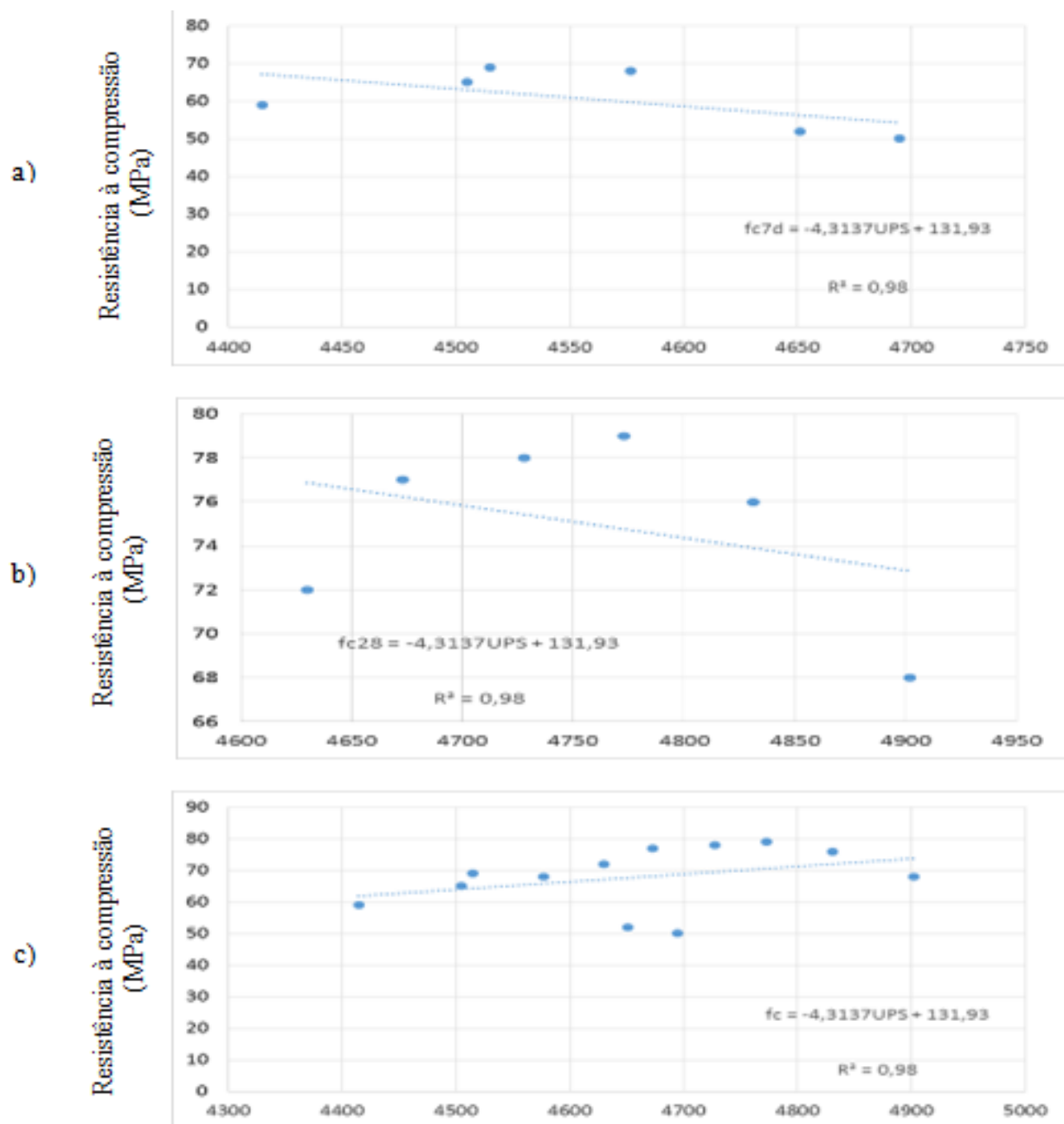


Fig. 6: Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de ultra-sons: a) Para 7 dias de cura; b) Para 28 dias de cura; c) Ambos os tempos de cura

Difusão de cloretos. Os resultados da difusão de cloretos são apresentados na Fig. 8. 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 4) 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 (Fig. 9) conformando resultados de outros autores [25,26].

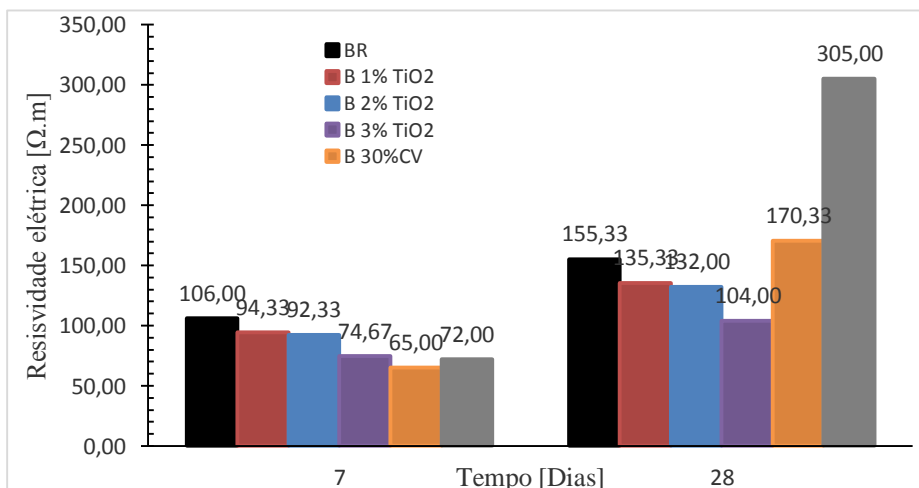


Fig. 7: Resultados da resistividade elétrica de todas as composições

Tabela 3: Risco de corrosão de acordo com a resistividade do betão

| Resistividade do Betão ($\Omega.m$) | Risco Corrosão |
|---------------------------------------|----------------|
| <50 | Muito alto |
| 50-100 | Alto |
| 100-200 | Baixo |
| >200 | Muito baixo |

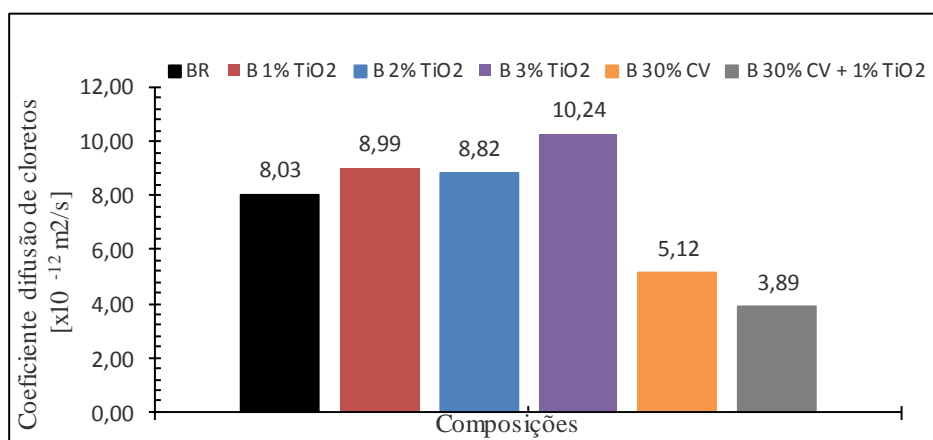


Fig. 8: Resultados difusão de cloretos de todas as composições

Tabela 4 - Resistência à penetração de cloretos [24]

| D_{NSM} [x10 ⁻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 |

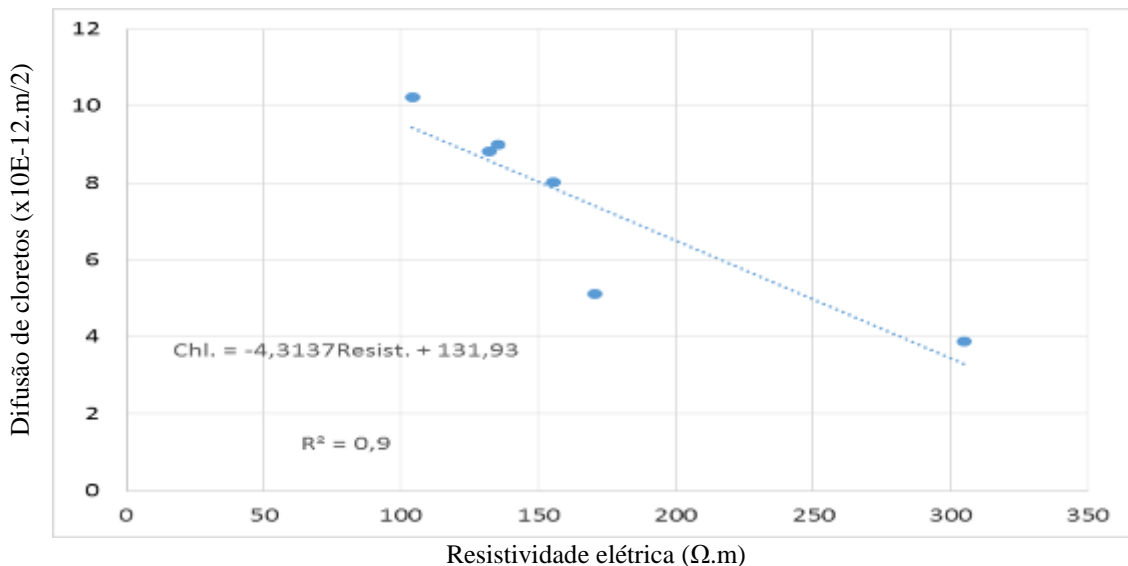


Fig. 9: Correlação entre a difusão de cloretos e a resistividade elétrica

Resistência ao ataque químico. A Fig. 10 apresenta os resultados da resistência ao ataque químico. 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 TiO₂ apresentam melhor comportamento que o das composições cinzas volantes contudo ainda assim inferior à composição de referência. Somente a composição com 1% de nano-partículas de TiO₂ 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.

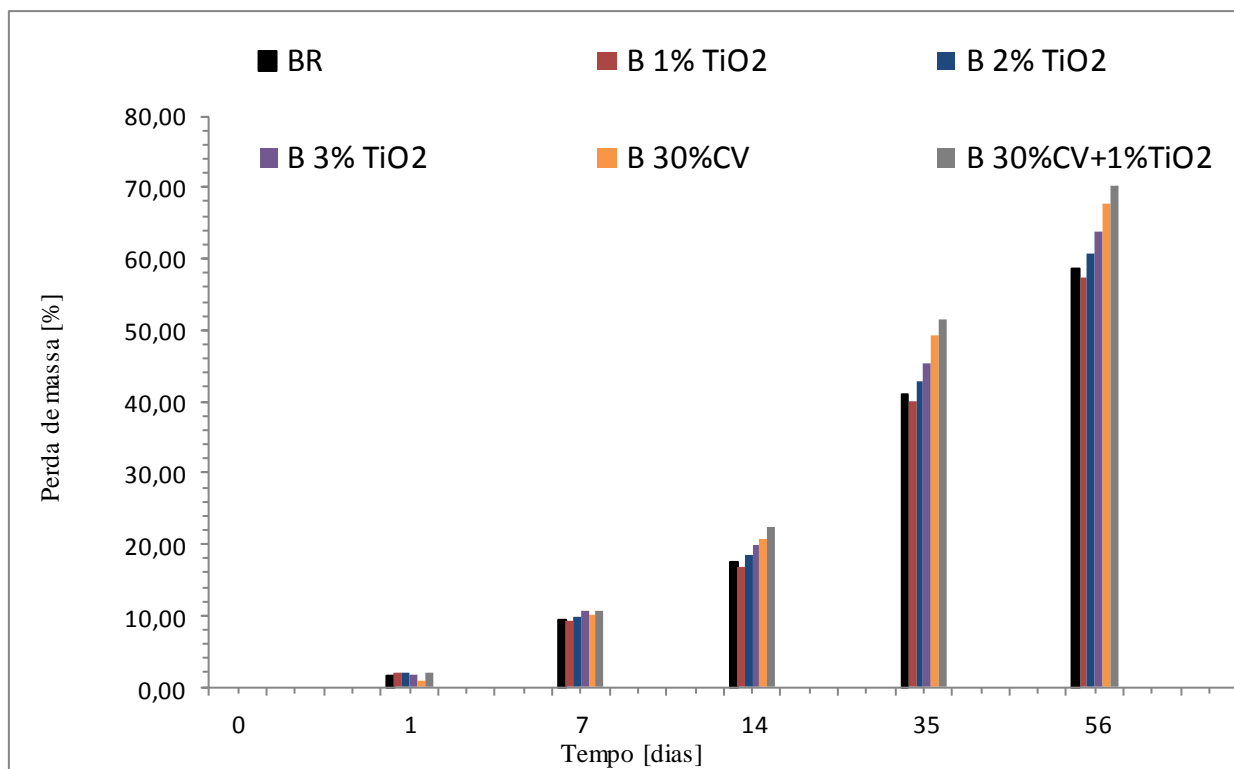


Fig. 10: Resultados do ensaio de ataque químico

Conclusões

- A utilização de 1% de nano-partículas de TiO₂ parece ser uma percentagem óptima 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 uma percentagem óptima em termos da resistência ao ataque químico;

Referências

- [1] P.-C. Aïtcin: High-Performance Concrete. E & FN Spon, an imprint of Routledge 11 New Fetter Lane, London (1998)
- [2] ERMCO: Statistics of the year 2012. Boulevard du Souverain 68, B-1170 Brussels, Belgium (2013)
- [3] J. Hegger, A. Nitsch and J. Burkhardt (1997) Hchleistungsbeton im Fertigteilbau. Betonwerk Fertigteil - Technik 2, 81-90.
- [4] L.C. Hollaway 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)
- [5] F. Pacheco-Torgal: Execução e reparação de infra-estruturas com betões correntes ou o barato sai caro (em termos económicos e ambientais). Revista Maquinaria – Angola, 227 (2012) p.56-62.
- [6] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali: Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of building materials. Construction and Building Materials 25 (2011) p.582-590.
- [7] F. Pacheco-Torgal and S. Miraldo, Y. Ding and J. Labrincha: Targeting HPC with the help of nanoparticles. An overview, Construction and Building Materials 38 (2013) p.356-370.
- [8] A. Boukni, R. Swamy and A. Bali: Durability properties of containing 50% and 65% slag. Construction and Building Materials, 23, (2009) p.2836-2845.
- [9] F. Pacheco-Torgal, A. Shasavandi and S. Jalali: 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).
- [10] Toxicity of nanoparticles. In Toxicity of building materials. Edited by F.Pacheco Torgal, S. Jalali and A. Fucic, WoodHead Publishing Ltd, Cambridge, UK (2012)

- [11] NP EN 206-1: 2007, Betão-Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa (1997)
- [12] LNEC E 394-1993. Betões: Determinação da absorção de água por imersão. Lisboa (1993)
- [13] LNEC E393. Betões: Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade, Lisboa (1993).
- [14] NP EN 12504-4. Ensaio do betão em estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Lisboa (2007)
- [15] R. Polder: Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete – A RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials* 15 (2001) p.125-131.
- [16] LNEC E 463. Betões: Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa (2004)
- [17] A. Nazari and S. Riahi: The effects of zinc dioxide nanoparticles on flexural strength of self-compacting concrete. *Composites: Part B* 42 (2011) p.167–75.
- [18] A. Nazari and S. Riahi: Al₂O₃ nanoparticles in concrete and different curing media. *Energy and Buildings* 43 (2011) p.1480–1488.
- [19] A. Givi, S. Rashid, F. Aziz and M. Salleh: Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites: Part B* 41 (2010) p.673–677.
- [20] X. He and X. Shi: 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, 2008, D.C., pp. 13–21.
- [21] M.-H. Zhang and H. Li: Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement. *Construction and Building Materials* 25 (2011) p.608–616.
- [22] F. Azevedo, F. Pacheco-Torgal, C. Jesus and J.L. Barroso de Aguiar: Properties and durability of HPC with tyre rubber waste. *Construction and Building Materials* 34 (2012) p.186-191.
- [23] S. Ozkan and O. Gjørsv: Electrical resistivity measurements for the quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal* 105 (2008) p.541-547.
- [24] O. E. Gjørsv: 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 (1996) p. 259-279.
- [25] A. Camões: Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho (2002)
- [26] O.E. Gjørsv: 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, 2003, Ain Shams University, Cairo, p. 10