

VNÚTORNÉ OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU ĽAHKÝM KAMENIVOM

Peter BRIATKA

*Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 813 68 Bratislava
briatka.p@gmail.com*

Abstrakt

Jednou z progresívnych a v súčasnosti sa prudko rozvíjajúcich metód ošetrovania betónu je vnútorné ošetrovanie (IC). Pod pojmom vnútorné ošetrovanie si môžeme predstaviť dodávanie "ošetrovacej" vody priamo z vnútra betónu, kde je zabudovaná už počas jeho miešania a to v hmote určitého nosiča tak, aby nezvyšovala vodný súčiniteľ čerstvého betónu a zároveň aby bola k dispozícii k náhrade stratenej vody či už odparovaním alebo autogénnym vysychaním. Jednou z možností ako zabudovať ošetrovaciu vodu do betónu je náhrada určitej časti normálneho kameniva nasiaknutým ľahkým kamenivom (SLWA), ktorému sa venuje tento článok. Najširšie uplatnenie vnútorného ošetrovania a tým aj SLWA sa javí v betónových konštrukciách s vysokým povrchovým modulom a zvlášť v tzv. vysokohodnotných betónoch, kde sa vonkajšie ošetrovanie dodávaním vody stáva neúčinným z dôvodu veľmi malej permeability betónu.

Kľúčové slová: vnútorné ošetrovanie, betón, ľahké kamenivo, zmrašťovanie, vysychanie

Ľahké kamenivo

Ľahké kamenivo uvažované pre účely ošetrovania betónu je priemyselne vyrábané kamenivo. Základnou surovinou sú horniny s vysokým obsahom ílov a ílovitých bridlíc, ktorých výpalom pri teplote cca 1090°C a vyvolanou expanziou sa získava zrnitý pórovitý materiál so slinutým povrchom. Pórovitá štruktúra je dôsledkom vyhorievania organických zložiek základnej suroviny. Z hľadiska granulometrie zŕn sa rozlišujú dva druhy LWA – s nepravidelnými ostrohrannými zrnami (USA) a naopak s pravidelnými guľovitými zrnami (EU).

Vnútorné ošetrovanie použitím nasiaknutého ľahkého kameniva

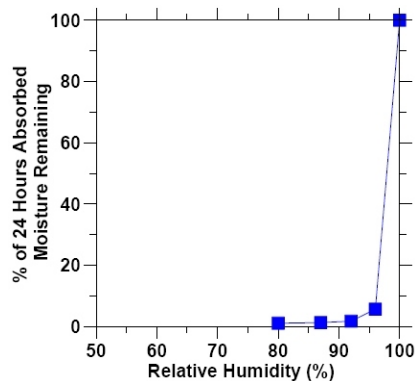
Ak má LWA pôsobiť ako činiteľ IC betónu (tzv. samoošetrovanie), potom musí byť schopné absorpcie značného množstva vody do svojej štruktúry. Týmto sa ale požiadavky naň nekončia. Voda z vnútra LWA sa musí dostať do tuhnúceho a tvrdnúceho cementového tmelu podstupujúceho samovysychanie. Počas vonkajšieho vysychania a/alebo samovysychania je voda postupne vyprázdňovaná z pórovej štruktúry SLWA a dopĺňaná do cementového tmelu. Z Young-Laplace(ho) rovnice (vzťah 1) a z princípu zachovania minimálnej vnútornej energie systému vyplýva, že pri strate vlhkosti z cementového tmelu vznikajú spočiatku relatívne malé napätia, ktoré nie sú schopné prekonať väzbové sily vody v malých póroch cementového tmelu a preto sa ako prvé vyprázdňujú najväčšie póry SLWA, čím sa systém dostáva do elementárnej rovnováhy v diskretnom časovom okamihu. Polomer vyprázdňovaných pórov r_{CAP} je nepriamo úmerný napätiu v pórovom roztoku cementového tmelu (funkcia RH). Keď cementový tmel stráca vlhkosť narastajú v ňom napätia P_{CAP} . Dosadením narastajúcich P_{CAP} do vzťahu 1 je zrejmé, že sa postupne znižuje polomer pórov SLWA, z ktorých je cementový tmel schopný čerpať vodu.

$$r_{CAP} = - \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{P_{CAP}} \quad (m) \quad (1)$$

γ - povrchové napätie pórového roztoku (N/m)

θ - stykový uhol pórového roztoku a steny kapiláry, (uvažuje sa dokonalé zmáčanie a teda $\theta=0$ rad)

Aby mohla byť voda z nasýteného LWA (SLWA) jednoducho vytiahnutá (obr. 1) musia byť vyvolané ťahové napätia v cementovom tmele vyššie ako napätia zadržiavajúce vodu v SLWA. Posledná podmienka bude splnená ak aj tie najmenšie póry LWA budú mať veľkosť väčšiu ako póry v cementovom tmele.



Obr. 1 Strata vlhkosti SLWA v závislosti od vlhkosti okolitého prostredia [2]

Vychádzajúc z požiadavky na veľkosť pórov SLWA sa jednoduchou úvahou zohľadňujúcou závislosť veľkosti vyprázdňovaných pórov od kapilárneho napätia (vzťah 1) dostaneme ku vzťahu vyjadrujúcemu relatívnu vlhkosť (RH) cementového tmelu, pri ktorej dochádza k vyprázdňovaniu pórov určitého rozmeru (r_{CAP}) (vzťah 2) a k informácii, že skoro všetka voda viazaná v SLWA sa uvoľní pri poklese RH na 80% (obr. 5).

$$RH = e^{\left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta \cdot V_{mol,f}}{r_{CAP} \cdot R \cdot T} \right)} \quad (-) \quad (2)$$

R - univerzálna plynová konštanta = 8,3114 J/mol/K

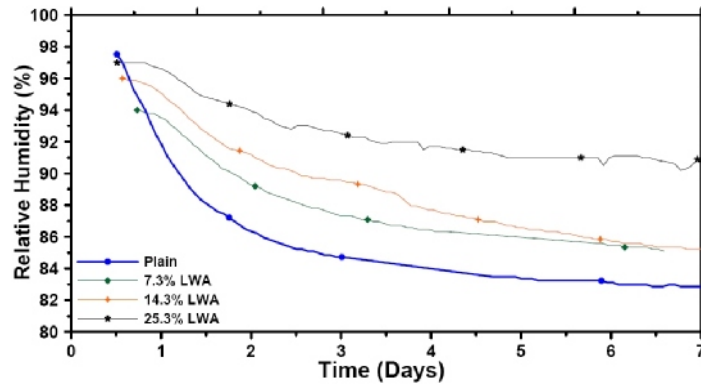
T - absolútna teplota (K)

$V_{mol,f}$ - molový objem pórového roztoku, $V_{mol,f} \approx 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$

Keďže najväčšie úbytky ošetrovacej vody z SLWA sa vyskytujú už pri nepatrnom poklese RH na úroveň cca 95% a zodpovedajúcom napätí cca 10 MPa ($r_{CAP} \geq$ cca 20 nm) je zrejmé, že IC pôsobí len v počiatoch veku betónu. Doba pôsobenia IC je závislá najmä od dávky SLWA (množstva ošetrovacej vody) a podmienok za akých betón tuhne a tvrdne.

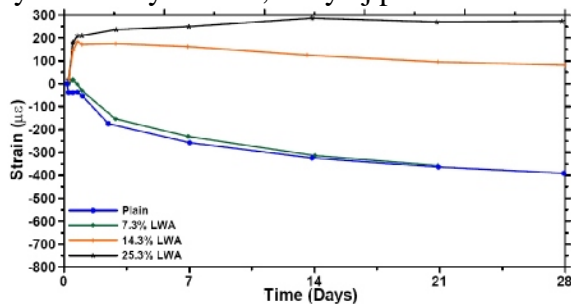
Ošetrovanie tzv. uzavretého systému

Betón utesnený (sealed) reprezentuje uzavretý systém, v ktorom dochádza ku strate vlhkosti iba spotrebou vody na hydratáciu (tzv. samovysychanie). Dôsledkom samovysychania je chemické zmrašťovanie a jeho vonkajší prejav autogénne zmrašťovanie. IC je v tomto prípade navrhnuté na poskytnutie takého množstva vody, z vnútra betónu, aby mohla hydratácia prebehnúť úplne (maximálny stupeň hydratácie $\alpha_{max}=1$) a aby sa obmedzilo prípadne úplne eliminovalo autogénne zmrašťovanie. Voda spotrebovaná na hydratáciu spôsobuje pokles RH a tým napätie v pórovom roztoku ktoré sa kompenzuje vyprázdňovaním pórov SLWA. Týmto princípom sa systém udržiava v rovnováhe. Čím viac vody je SLWA schopné uvoľniť pri danej RH tým dlhšie systém zostane v rovnováhe (obr. 2), čo je výhodné z dôvodu oddialenia prechodu na nižšiu úroveň RH (vyššie napätie) zatiaľ čo narastá pevnosť materiálu. Takto možno jednoduchšie interpretovať spojitý priebeh procesu jeho zdiskrétnením.

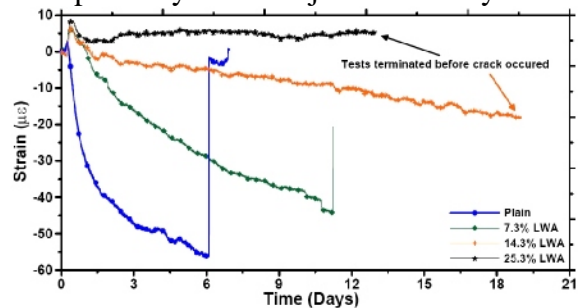


Obr. 2 Merané vlhkosti betónu s rôznymi podielmi SLWA a obsiahnutej vody [2]

Merania voľného aj obmedzeného autogénneho zmršťovania malty ($w/c=0,3$) s rôznymi podielmi SLWA dokazujú funkčnosť IC v uzavretom systéme. Obrázok 3 zachytáva voľné autogénne zmršťovanie. Je vidno, že už náhrada 7,3% hutného kameniva za SLWA sa prejavuje počas prvých 21 dní veku vzorky aj keď priebeh pomerných pretvorení je veľmi podobný vzorke bez IC (dôsledok veľkej vzdialenosti zrníčok SLWA). Oveľa výraznejšie sú vyššie dávky SLWA, kedy aj po 28 dňoch nenastali záporné výsledné objemové zmeny.



Obr. 3 Voľné autogénne zmršťovanie (za nulu sa považuje začiatok tuhnutia) [2]



Obr. 4 Obmedzené autogénne zmršťovanie [2]

Pohľad na realistickejšie podmienky, t.j. obmedzené autogénne zmršťovanie (ASTM C 1581-04) poskytuje obr. 4. Priebeh pomerných pretvorení dokumentuje hlavne dobu vzniku trhliny. Zatiaľ čo vzorka bez IC pukla po šiestich dňoch, vzorka s dávkou 7,3% SLWA zostala neporušená takmer dvojnásobnú dobu. Vzhľadom na výsledky voľného zmršťovania by sa neočakával taký dramatický posun, no možno ho vysvetliť znížením modulu pružnosti, zvýšením dotvarovania a zvýšením tuhosti spôsobenými prítomnosťou SLWA [2].

Obrázky 2 – 4 dokazujú účinnosť IC použitím SLWA. Malty (veľmi podobne aj betóny) s nižším vodným súčiniteľom podliehajú samovysychaniu, ktoré je možné účinne obmedzovať používaním IC s vyššími náhradami SLWA za bežné hutné kamenivo. Preukázala sa účinnosť SLWA v zmysle spomaľovania tempa a aj absolútnej hodnoty zmršťovania.

Koncept uzavretého systému je síce zaujímavý, no z technologického hľadiska betonáže doskových telies prakticky nerealizovateľný a navyše nevýhodný. Preto sa pozornosť v oblasti IC venuje realistickému otvorenému systému.

Ošetrovanie tzv. otvoreného systému

Otvorený systém (unsealed) je charakteristický stratou vlhkosti dvomi spôsobmi. Jedným je už popísané samovysychanie a druhým je strata vlhkosti do okolitého prostredia pričom sa

uvažuje len s hornou exponovanou plochou. Strata vlhkosti zvyšnými plochami sa zanedbáva pretože bočné steny konštrukcie sú neporovnateľne menšie ako plocha hornej a dolnej podstavy dosky a popritom sú (aj keď nedokonale) utesnené pomocnými alebo finálnymi príľahlými konštrukciami. Spodná plocha dosky sa rovnako považuje za utesnenú lebo je možné zamedziť strate vody jednoduchými a finančne nenáročnými operáciami alebo konštrukčnými vrstvami membránového typu.

Tým, že otvorený systém podstupuje stratu vody samovysychaním a okrem toho aj vonkajším vysychaním celkové zmrašťovanie bude tvorené zložkou autogénneho zmrašťovania (AS) ako aj zložkou zmrašťovania z vonkajšieho vysychania (DS). Ak chceme byť presnejší a zahrnúť aj vertikálne objemové zmeny prejavujúce sa pred zatuhnutím betónu musíme doplniť aj zložku chemického zmrašťovania (CS) čím sa dostaneme ku vzťahu 3. CS sa v makroskopickom pozorovaní prejavuje ako sadanie betónu a vedie k plastickému zmrašťovaniu (PS), ktoré, ako bolo dokázané, je tiež možné obmedziť alebo odstrániť použitím IC.

$$e_{SHR,U} = e_{DS} + e_{AS} + e_{CS} \quad (-) \quad (3)$$

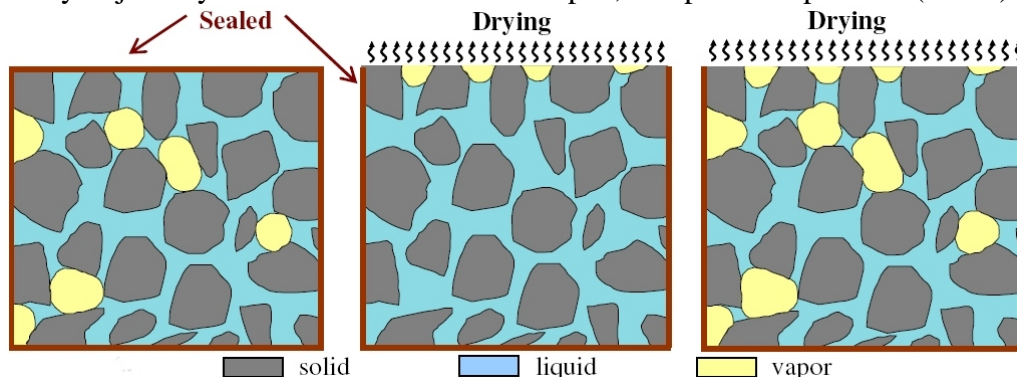
$\epsilon_{SHR,U}$ - celkové pomerné pretvorenie od zmrašťovania (-)

ϵ_{DS} - pomerné pretvorenie od zmrašťovania z vysychania (-)

ϵ_{AS} - pomerné pretvorenie od autogénneho zmrašťovania (-)

ϵ_{CS} - pomerné pretvorenie od chemického zmrašťovania (-)

Je potrebné si uvedomiť, že samovysychanie a vonkajšie vysychanie nie sú úplne nezávislé mechanizmy objemových zmien betónu. Práve naopak, oba pôsobia spoločne (obr. 5).



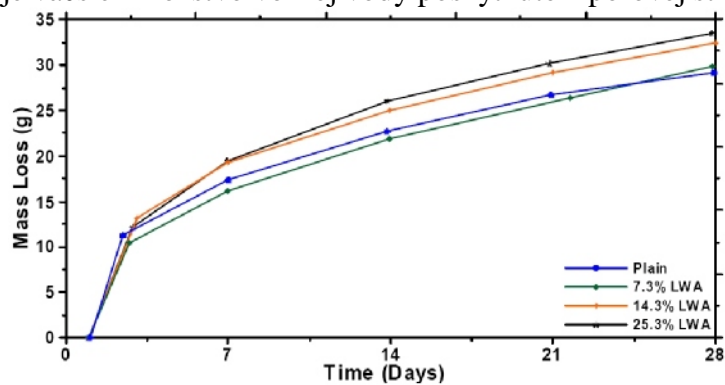
Obr. 5 Ilustrácia vysychania v utesnených a neutesených vzorkách (zľava utesnená s vnútorným vysychaním; neutesená len s vonkajším vysychaním; neutesená s vnútorným aj vonkajším vysychaním) [4]

Ich interakcia je dobre badateľná vtedy, keď sa porovnávajú RH na povrchu betónu a vo vnútri vzduchových dutiniek v cementovom tmele. Akonáhle sa systém približuje rovnovážnemu stavu s RH okolitého prostredia, všetky póry v betóne (na povrchu aj v jadrovej časti) sa musia limitne blížiť RH okolitého prostredia. Vonkajšie vysychanie tak nespôsobuje len vznik kapilárnych meniskov na povrchu cementového tmelu, ale riadi aj RH vo vzduchových dutinkách hlbšie v cementovom tmele [4].

Prítomnosť SLWA v otvorenom systéme poskytuje prebytočnú vlhkosť, ktorá môže byť spotrebovaná na odparovanie. Keď sa začne odparovať voda z povrchu betónu (nie vypotená voda), SLWA začína vplyvom narastajúceho kapilárneho napätia strácať pôvodnú vlhkosť udržiujúc malé póry cementového tmelu saturované. Betón takto vysychá, znižuje sa jeho RH. Prítomnosť a pôsobenie SLWA však riadia (spomaľujú) vysychanie tým, že pôsobia ako zásobníky vody, ktorú podľa aktuálnej potreby (RH resp. napätia) uvoľňujú do cementového

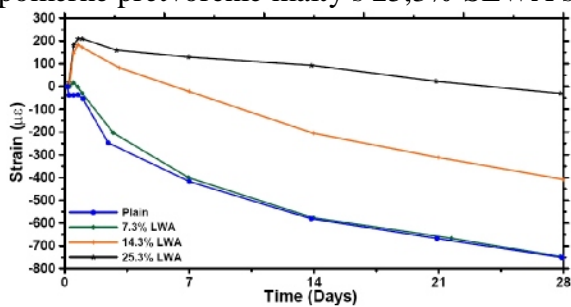
tmelu. Spomaľovaním tempa znižovania RH spomaľujú priebeh zmrašťovania, ale nie jeho konečnú veľkosť. Toto tvrdenie je podložené skutočnosťou, že SLWA oddialuje dosiahnutie rovnovážneho stavu medzi vlhkosťou betónu a vlhkosťou okolia, no RH prostredia býva väčšinou nižšie ako cca 80% (hodnota kedy SLWA stráca všetku vodu – podľa obr. 1), a preto strata vlhkosti z betónu pokračuje.

Obrázok 6 zachytáva stratu vody zo systému vystaveného vonkajšiemu vysychaniu. Ako sa predpokladalo, malty s určitým obsahom SLWA vykazujú väčšie straty vody ako referenčná vzorka. Dôvodom je väčšie množstvo voľnej vody poskytnuté z pórovej štruktúry SLWA.

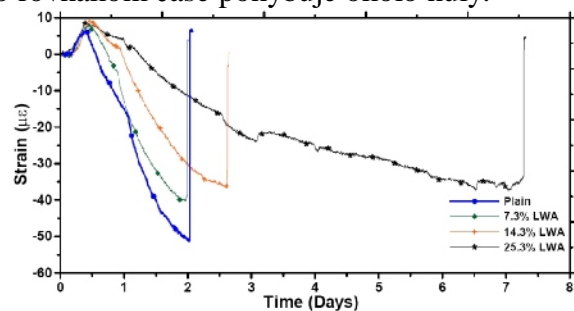


Obr. 6 Strata vody z otvoreného systému pri voľnom zmrašťovaní [2]

Voľné zmrašťovanie otvoreného systému prezentuje obr. 7. Rovnako ako tomu bolo aj v prípade uzavretého systému, referenčná vzorka a vzorka so 7,3% náhradou SLWA vykazujú veľmi podobné správanie. Je vidno, že v prvých 24 hodinách sa pomerné pretvorenie vzoriek vyvíjalo rovnako ako u uzavretého systému, čo je dôsledkom meracej metódy (ASTM C 157), kedy vzorky zostávajú prvých 24 hodín utesnené vo forme a podstupujú len samovysychanie. Po 24 hodinách sa odformujú a od tohto času sú vystavené vonkajšiemu vysychaniu. Zvyšujúca sa dávka SLWA a v ňom obsiahnutej ošetrovacej vody spôsobuje spomalenie zmrašťovania. Malta s náhradou 14,3% kameniva za SLWA dosiahla po 28 dňoch približne polovičné pomerné pretvorenie v porovnaní s referenčnou maltou. Čo je však zaujímavejšie, pomerné pretvorenie malty s 25,3% SLWA sa po rovnakom čase pohybuje okolo nuly.



Obr. 7 Voľné zmrašťovanie s vonkajším vysychaním (za nulu sa považuje začiatok tuhnutia) [2]



Obr. 8 Obmedzené zmrašťovanie s vonkajším vysychaním [2]

Obmedzené zmrašťovanie podľa obr. 8 dokumentuje rovnaký charakter pretvorení ako v prípade uzavretého systému, ale keďže otvorený systém stráca vlhkosť oveľa intenzívnejšie ako uzavretý (obr. 4) časy vzniku trhlín sa dramaticky skrátili. Vo vzorkách bez SLWA a s dávkou SLWA 7,3% a 14,3% vznikla trhlinka približne po dvoch dňoch. Je potrebné si uvedomiť, že vzorky boli opäť jeden deň vystavené iba vnútornému vysychaniu. Odformovanie je z obrázku čitateľné ako zrýchlenie objemových zmien po prvom dni. Každopádne sa aj pri otvorenom systéme potvrdilo, že IC použitím SLWA predlžuje čas kedy

dôjde ku dosiahnutiu kritického bodu – rovnováhy medzi aktuálnym napätím a pevnosťou materiálu v ťahu.

Záver

Vnútorne ošetrovanie čerstvého betónu použitím ľahkého kameniva sa preukázalo ako účinná metóda v boji s objemovými zmenami betónu a s vyvolaným vznikom trhlín. Stručné a kvalitatívne porovnanie parametrov zmršťovania betónov s a bez IC poskytuje Tab. 1.

Tab. 1 Porovnanie parametrov zmršťovania betónov bez IC a s IC (metódou SLWA) [4]

Autogénne zmršťovanie	
Objem vody spotrebovanej na hydratáciu	↔
Polomer meniskov	↑
Kapilárny tlak	↓
Vnútorná relatívna vlhkosť	↑
Voľné zmrštenie tmelu	↓
Strata hmotnosti vyparovaním	0
Zmršťovanie vonkajším vysychaním	
Saturácia tmelu	↔
Polomer meniskov	↔
Kapilárny tlak	↔
Vnútorná relatívna vlhkosť	RH prostredia
Celkové voľné zmrštenie tmelu	↔
Celková strata hmotnosti vyparovaním	↑
Tempo zmršťovania pred rovnováž. stavom	↓

Použitá literatúra a súvisiace dokumenty

- [1] LURA, P.: *Superabsorbent polymer in concrete*, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [2] HENKENSIEFKEN, R., NANTUNG, T., WEISS, W.J.: *Reducing Restrained Shrinkage in Concrete: Examining the Behavior of Self-Curing Concrete Made using Different Volumes of Saturated Lightweight Aggregate*, proceedings of Concrete Bridge Conference held in May 2008 in St. Louis, USA, 2008
- [3] ASTM C 1581-04 *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*.
- [4] RADLINSKA, A. et al.: *Shrinkage Mitigation Strategies in Cementitious Systems: a Closer Look at Differences in Sealed and Unsealed Behavior*, accepted by Transportation and Research Board for publication, Purdue University, West Lafayette, 2007
- [5] ASTM C 157 *Standard test method for length change for hardened hydraulic-cement, mortar and concrete*.
- [6] HENKENSIEFKEN, R., BRIATKA, P., BENTZ, D., NANTUNG, T., WEISS, J.: *Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures made with pre-wetted lightweight aggregate*, in Concrete International, ACI, February 2009, Farmington Hills, MI, USA, 2009
- [7] ASTM C 1579-06 *Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (Using a steel form insert)*.
- [8] BENTZ, D.P.: *Internal Curing Lightweight Aggregates – Part I*, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008
- [9] BENTZ, D.P., HALLECK, P.M., GRADER, A.S., ROBERTS, J.W.: *Four-Dimensional X-ray Microtomography Study of Water Movement during Internal Curing*, Proceedings of the International RILEM Conference – Volume Changes of Hardening Concrete, Bagneux, France, 2006