

## Problemy z betonami wysokiej klasy, o niskim w/c

### The problems with high strength and low w/c ratio concretes

#### 1. Wprowadzenie

Betony o małym stosunku w/c, mniejszym od 0,40, są obecnie stosowane do wznoszenia konstrukcji, bowiem spełniają one lepiej warunki zrównoważonego rozwoju i mają większą trwałość niż budowle z betonu o przeciętnej wytrzymałości. Na przykład przenoszenie obciążenia L przez kolumnę z niezbrojonego betonu, trzeba zużyć trzy razy mniej betonu w przypadku zastosowania betonu o wytrzymałości 75 MPa w porównaniu z betonem klasy C20/25. Proste wyliczenie pokazuje także, że zużycie cementu spada dwukrotnie w przypadku kolumny z betonu o wytrzymałości 75 MPa (Aïtcin, Mindess, 2013).

Stosowanie betonu o małym w/c może jednak powodować powstawanie dużych rys, jeżeli beton nie jest należycie pielęgnowany, przy użyciu wody. Po pierwsze, powierzchnia świeżego betonu może podlegać dużemu skurczowi plastycznemu w przypadku gorącej lub wietrznej pogody, gdyż nie jest zabezpieczona przed parowaniem pewnej ilości wody związanej z wydzielaniem mleczka. Po drugie, kontrakcja wynosząca 8% bezwzględnej objętości zaczynu cementowego powoduje szybki rozwój skurczu samorzutnego, który może spowodować duże wczesne spękania, w związku z czym konstrukcja z betonu o niskim w/c bez odpowiedniej wodnej pielęgnacji, będzie złożona z nieprzepuszczalnego betonu, poprzedzianego pęknięciami. Jednak, jeżeli zastosuje się należyłą pielęgnację wodną można łatwo wyeliminować obie przyczyny wywołujące powstawanie rys.

W celu podjęcia odpowiedniej pielęgnacji wodnej w przypadku betonów o małym w/c trzeba zrozumieć przebieg reakcji hydratacji i ich praktyczne konsekwencje.

Jest kilka różnych metod opisywania hydratacji cementu. W tym artykule nie będą rozważane złożone reakcje chemiczne zachodzące podczas hydratacji cząstek cementu z wodą, jak również towarzyszące im ciepło hydratacji. Omówimy tylko **objętościowy** aspekt hydratacji cementu, a mianowicie zmniejszenie całkowitej objętości zaczynu cementowego w trakcie hydratacji.

#### 1. Introduction

Concretes having water/cement ratio lower than 0.40 are used presently to build structures that are at the same time more sustainable and durable than structures built with a normal strength concrete. For example, to sustain a given load L with an unreinforced concrete column, it is necessary to use 3 times less concrete to build it with a 75 MPa concrete than with a 25 MPa one. A simple calculation shows also that 2 times less cement is used to build the 75 MPa column (Aïtcin, Mindess, 2013).

But the use of a low w/c concrete can result in a severe cracking if it is not properly water cured. First, the surface of the fresh concrete can experience severe plastic shrinkage in hot weather and/or windy conditions, because it is not protected against evaporation by some bleeding water. Second, the volumetric contraction of 8% of the absolute volume of the cement paste results in the rapid development of autogenous shrinkage that can generate a severe early cracking, so that a structure built with a low w/c concrete that is not properly water cured, is finally built with a very impermeable concrete in between cracks. However, if a proper water curing approach is taken, it is easy to practically eliminate those two causes of cracking.

In order to develop an appropriate approach of water curing for low w/c concrete, it is necessary to go back to a basic understanding of hydration reactions and their practical consequences.

There are many different ways to describe cement hydration. In this presentation, the development of the complex chemical reactions occurring when the cement particles react with water will not be considered, as well as the heat developed during hydration. Only the **volumetric** aspect of cement hydration will be discussed: the absolute volume of the hydrating cement paste decreases.

All the engineers know that the hydration is composed of the chemical reactions that result in the creation of bonds that give the strength to concrete. They also know that these chemical reactions are accompanied by the development of some heat.

Wszyscy inżynierowie wiedzą, że hydratacja składa się z reakcji chemicznych, które powodują powstawanie wiązań, zapewniających betonowi wytrzymałość. Wiedzą także, że tym reakcjom chemicznym towarzyszy wydzielanie ciepła. Jednak niewielu inżynierów martwi się, lub wręcz zapomniało, że reakcje hydratacji są połączone z kontrakcją objętościową wynoszącą 8% bezwzględnej objętości zaczynu cementowego. To zmniejszenie objętości powoduje powstanie porów w betonie, ponieważ całkowita objętość powstałych hydratów jest mniejsza niż objętość cementu i wody, biorących udział w tej reakcji.

Ta ignorancja jest spowodowana faktem, że przed stosowaniem betonów o małym w/c, nie było potrzeby martwić się o praktyczne skutki tego zmniejszenia objętości. Rzeczywiście, w przypadku betonów o dużym w/c, które były dotychczas stosowane i będą stosowane w dalszym ciągu, bardzo drobne pory powstałe w trakcie hydratacji cementu, które odsysają wodę z większych kapilar, wywołują powstawanie w nich menisków. W związku z tym wywołują one bardzo małe naprężenia rozciągające w czasie twardnienia zaczynu. Skurcz wywołany tymi meniskami w kapilarach jest więc pomijalnie mały.

Sytuacja jest zupełnie inna w przypadku betonów o małym w/c, w których meniski powstają w znacznie mniejszych kapilarach. Im niższy w/c tym mniejsze są kapilary, w których powstają meniski oraz większy i szybciej występujący skurcz autogeniczny, którego nie można już pomijać. W betonie o małym w/c nie można ignorować wpływu kontrakcji chemicznej na skurcz.

W celu lepszego zrozumienia tego zjawiska wrócimy do badań, które przeprowadził 100 lat temu Le Chatelier, a następnie do prac Powersa, dotyczących hydratacji cementu w betonie, które prowadził on w latach pięćdziesiątych.

## 2. Hydratacja cementu

### 2.1. Doświadczenie Le Chateliera

Ponad 100 lat temu Le Chatelier (1904) przeprowadził pierwsze naukowe badania hydratacji cementu portlandzkiego przy zastosowaniu bardzo skromnych urządzeń, dostępnych w tym czasie. Jego proste doświadczenie pokazano na rysunku 1. Obserwował on, w temperaturze pokojowej, dwa zaczyny cementowe; jeden hydratyzował w powietrzu, a drugi pod wodą.

Wnioski wyciągnięte przez Le Chateliera były bardzo proste: podczas hydratacji zaczyn cementowy zmniejsza swoją bezwzględną objętość o 8% [kontrakcja], a zmiany jego objętości względnej zależą od warunków w jakich dojrzewa: jeżeli zaczyn dojrzewa w powietrzu to ulega skurczowi, jeżeli dojrzewa w wodzie to się rozszerza.

Duran-Herrera i in. (2008) ustalili, że to pęcznienie wzrasta z temperaturą, jeżeli zaczyn dojrzewa w quasi adiabatycznych warunkach.

Kontrakcja chemiczna, występująca w przypadku dowolnego cementu portlandzkiego jest spowodowana tym, że bezwzględna

But few engineers are aware, or have forgotten, that hydration reactions are accompanied by a volumetric contraction of 8% of the absolute volume of the cement paste. This volumetric contraction creates porosity within concrete because the absolute volume of the hydrates that are formed is smaller than the volume of cement and water, that are combined.

This ignorance, or this leaving out, is due to the fact that until the recent use of low w/c concrete, it was not necessary to take care of the practical consequences of this volumetric contraction. In fact, in the high w/c ratio concretes, that have been and that are used today, the very fine porosity occurring during cement hydration sucks water from the larger capillaries so that menisci are appearing in large capillaries. Therefore they create very low tensile stresses within the hardening paste. The shrinkage generated by these menisci is therefore negligible.

This is not anymore the case in low w/c concretes where these menisci are appearing in much smaller capillaries; The lower the w/c, the finer the capillaries in which the menisci are appearing and the faster and greater the development of a no more negligible autogenous shrinkage. In a low w/c concrete, it is no more possible to ignore the effect of the chemical contraction on shrinkage.

In order to better understand this phenomena let us go back 100 years ago and present the results of Le Chatelier's experiment and then Power's work on concrete hydration done in the fifties.

## 2. Hydration Reaction

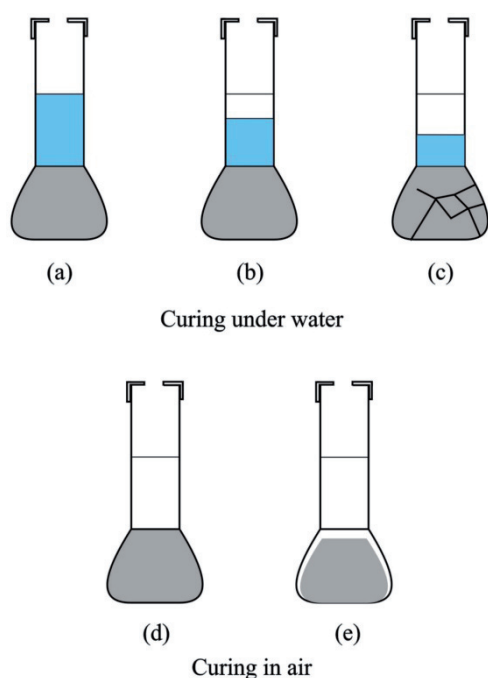
### 2.1. Le Chatelier experiment

More than 100 years ago, Le Chatelier (1904) undertook the first scientific study of Portland cement hydration with the very little scientific instruments available at his time. He did a very simple experiment schematically represented in Figure 1. He observed at **ambient temperature** two cement pastes, one hydrating in air and a second one under water.

His conclusions were very simple: during hydration a cement paste develops 8% contraction of its absolute volume and a volumetric variation of its apparent volume that depends on its mode of curing: if the paste is cured in air, it shrinks, if it is cured under water, it swells.

Duran-Herrera et al. (2008) found that this swelling increases as the hydration temperature increases when the paste is cured in quasi adiabatic conditions.

The chemical contraction observed with any Portland cement is due to the fact that the absolute volume of the hydrates formed is smaller than the sum of the absolute volume of the cement and of water that have been combined. Fifty years later, Powers confirmed this 8% contraction of the absolute volume of the cement paste found by Le Chatelier.



Rys. 1. Doświadczenie, które przeprowadził Le Chatelier.

Fig. 1. Schematic representation of the Le Chatelier experiment.

objętość utworzonych hydratów jest mniejsza od sumy bezwzględnych objętości cementu i wody, które przereagowały. Pięćdziesiąt lat później Powers potwierdził o 8% zmniejszenie objętości bezwzględnej zaczynu cementowego, odkryte przez Le Chateliera.

Ostatnio poprosiłem dr Mladenkę Coric, moją doktorantkę, o powtórzenie doświadczenia Le Chateliera, z nowoczesnymi cementami i stosując różne stosunki w/c. Poprosiłem ją również aby pokryła jeden z zaczynów cementowych, olejem hydraulicznym o bardzo dużej płynności, przy równoczesnym zastosowaniu różnych stosunków w/c. Chodziło w tym przypadku o zbadanie, czy ten olej migrując do zaczynu cementowego przyczyni się do rozsadzenia kolby.

Coric odtworzyła doświadczalne wyniki Le Chateliera, niezależnie od rodzaju cementu i stosunku w/c; wszystkie kolby popękały po pewnej czasie, z wyjątkiem jednej, w której zaczyn cementowy hydratyzował pod warstwą oleju.

Oznacza to, że pęcznienie zaczynu, występujące w pozostałych kolbach jest spowodowane jedną z właściwości procesu hydratacji.

Zmniejszenie objętości względnej zaczynu cementowego dojrzewającego w powietrzu można wyjaśnić powstawaniem menisków w kapilarach, tworzących się w twardniejącym zaczynie w wyniku kontrakcji chemicznej zaczynu cemento-

Recently, I asked my Ph.D. student, Mladenka Coric to reproduce Le Chatelier experiment with some modern cements using different W/C ratios. I asked her also to cover one of the cement paste with a very fluid hydraulic oil in order to see if the penetration of this oil within the cement paste will rupture the flask.

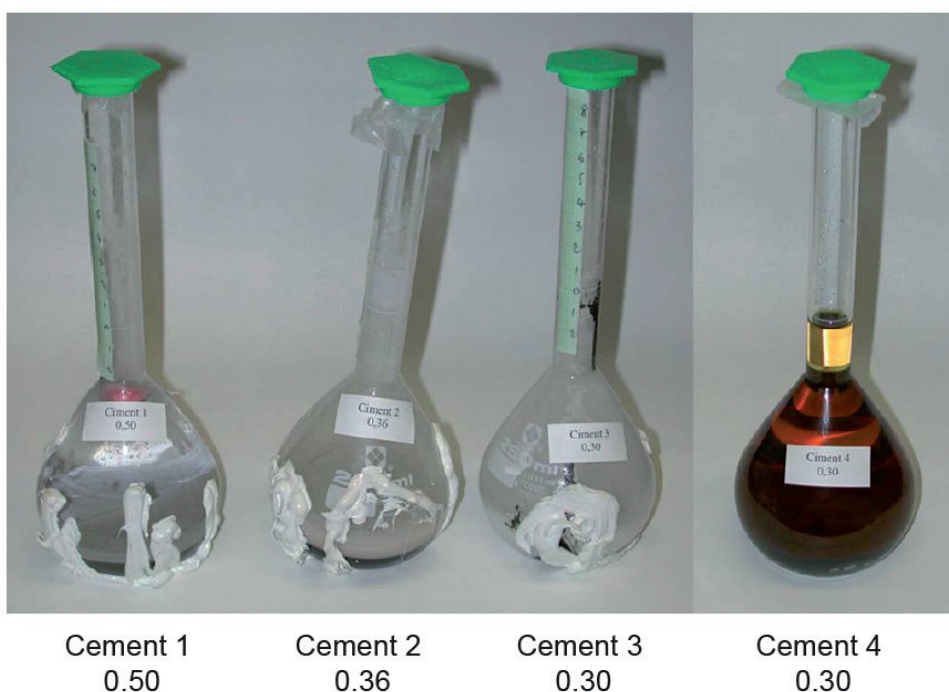
She was able to reproduce Le Chatelier results whatever the cement and the w/w were; particularly, all the flasks were ruptured after a while except the one in which the cement paste hydrated under oil. This means that the swelling observed in the other flasks is linked to one of the chemical aspect of hydration.

The contraction of the apparent volume of the cement paste cured in air can be explained by the formation of menisci in the capillaries appearing in the hardening paste due to the chemical contraction of the cement paste. These menisci create tensile stresses that contract the apparent volume of the hardening cement paste. But, if these capillaries are filled with water as soon as they are appearing when the paste is cured under water, no menisci are formed and no tensile stresses are developed, therefore the cement paste does not shrink.

Humbly le Chatelier admitted that he was unable to explain why the paste cured under water was swelling and breaking the glass container after a while. We must admit that 100 years later we have not yet a clear explanation for such behaviour. For Vernet, when a cement paste is cured under water, the formation of crystals having a rapid growth is favoured and these crystals act as micro jacks within the paste creating the observed swelling.

## 2.2. Powers' Work on Hydration

During the 1950's, Powers (1968) followed the development of cement hydration in a quantitative manner. He found that:



Rys. 2. Odtworzenie doświadczenia Le Chatelier z zastosowaniem nowoczesnych cementów.

Fig. 2. Reproduction of the Le Chatelier experiment with modern cements.

wego. Te meniski wywołują naprężenia rozciągające, które zmniejszają względną objętość twardniejącego zaczynu cementowego. Jednak jeżeli te kapilary są wypełnione wodą, tak długo jak długo powstają w czasie gdy zaczyn jest pod wodą w wyniku pielęgnacji, meniski nie powstają i nie tworzą się naprężenia rozciągające, w związku z czym zaczyn cementowy nie kurczy się.

Le Chatelier stwierdził skromnie, że nie potrafi wyjaśnić dlaczego zaczyn przechowywany pod wodą rozszerzał się i rozsadził kolbę szklaną po pewnym czasie. Trzeba podkreślić, że 100 lat później my także nie mamy jasnego wyjaśnienia tego zjawiska. Vernet uważa, że w zaczynie cementowym dojrzewającym pod wodą, powstawanie kryształów wykazujących szybki wzrost jest uprzywilejowane, a wzrost ten wywiera ciśnienie krystalizacji, powodujące obserwowaną ekspansję.

## 2.2. Badania procesu hydratacji przez Powersa

W latach pięćdziesiątych Powers (1968) badał wzrost stopnia hydratacji cementu w sposób ilościowy. Stwierdził on, co następuje:

- w celu uzyskania pełnej hydratacji zaczyn cementowy musi mieć stosunek w/c wynoszący co najmniej 0,42,
- są dwa mechanizmy reakcji wody z cementem portlandzkim:
  - chemiczny powodujący powstanie tak zwanego „żelu cementowego”,
  - fizyczny, tworzący tak zwaną „wodę w żelu” (pewna ilość cząsteczek wody jest fizycznie związana ze zhydratowanymi cząstkami cementu [woda pomiędzy warstwami C-S-H], pomimo że nie uczestniczyła w chemicznej reakcji).

Spostrzeżenia Powersa można przedstawić bardzo prosto posługując się schematem zaproponowanym przez Jensena i Hansena (2001). Oś x pokazuje stopień hydratacji, a na osi y zaznaczono względną objętość (rysunek 3). Stopień hydratacji przedstawia udział cząstek cementu, które uległy hydratacji, wyrażoną liczbowo w zakresie od 0 do 1.

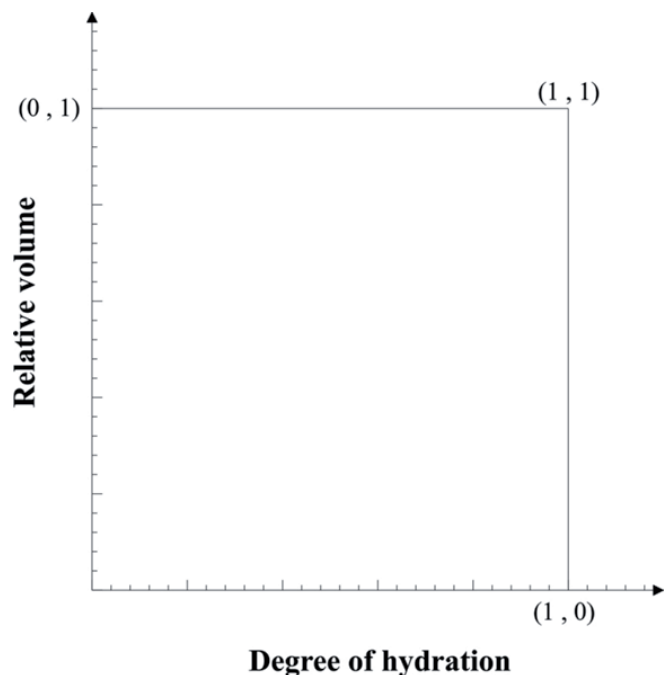
Stosując tę metodę pokażemy kilka przypadków obejmujących zaczyn cementowy.

### 2.2.1. Hydratacja zaczynu cementowego o w/c 0,42 i twardniejącego w powietrzu

#### 2.2.1.1. Zaczyn twardniejący w powietrzu w układzie zamkniętym

Jak to pokazano na rysunku 4 pewna ilość wody łączy się chemicznie z cementem portlandzkim tworząc żel, a pewna łączy się fizycznie tworząc wodę żelową. Pełna hydratacja powoduje zmniejszenie bezwzględnej objętości stwardniałego zaczynu cementowego, zgodnego z pomiarami Le Chatelier (8%).

Z tego powodu beton twardniejąc staje się porowaty i powstaje więźba małych kapilar, które odsysają wodę zawartą w utworzonych dużych kapilarach. W tych ostatnich powstają meniski, jednak w związku z tym, że mają duże średnice nie wywołuje to dużych naprężeń, które mogłyby spowodować znaczne zmniejszenie



Rys. 3. Układ współrzędnych do zobrazowania wyników prac Powersa.

Fig. 3. Jensen and Hansen system of coordinates to represent schematically Powers' work on hydration.

- in order to reach full hydration, a cement paste must have a W/C ratio equal to at least 0.42,
- water reacts with Portland cement in two ways:
  - chemically, to form what he called a “cement-gel”;
  - physically, to form what he called a “gel-water” (some water molecules are physically linked to the hydrated cement particles in spite of the fact that they have not reacted chemically).

Powers' observations can be illustrated very simply by using the schematic representation proposed by Jensen and Hansen (2001), where the degree of hydration is given on the x-axis and the relative volumes on the y-axis, as shown in Figure 3. The degree of hydration represent the proportion of cement particles that have been hydrated expressed as a number comprised between 0 and 1.

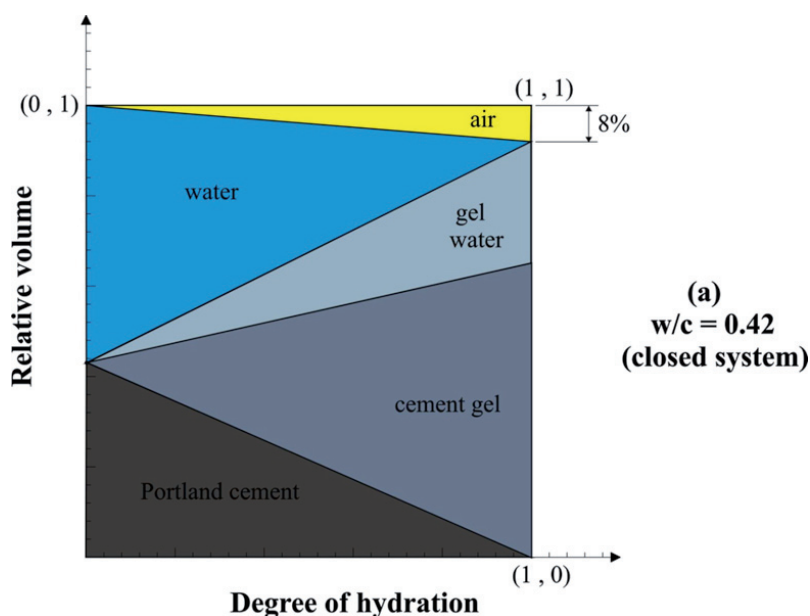
Using this representation, let us now consider a few particular cement pastes.

### 2.2.1. Hydration of a cement paste having a w/c equal to 0.42 that hardens in air

#### 2.2.1.1. Hardening in air in a closed system

As may be seen in Fig. 4, some water combines chemically with Portland cement to form a solid gel, and some combines physically to form the gel-water. Full hydration also results in a reduction of the absolute volume of the hardened cement paste equal to that already measured by Le Chatelier (8%). Therefore, when concrete hardens, it becomes porous.

Therefore, when concrete hardens, it becomes porous and a network of fine capillaries that sucks the capillary water contained in



Rys. 4. Schemat zaczynu cementowego o  $w/c = 0,42$ , który zhydratyzował w zamkniętym układzie.

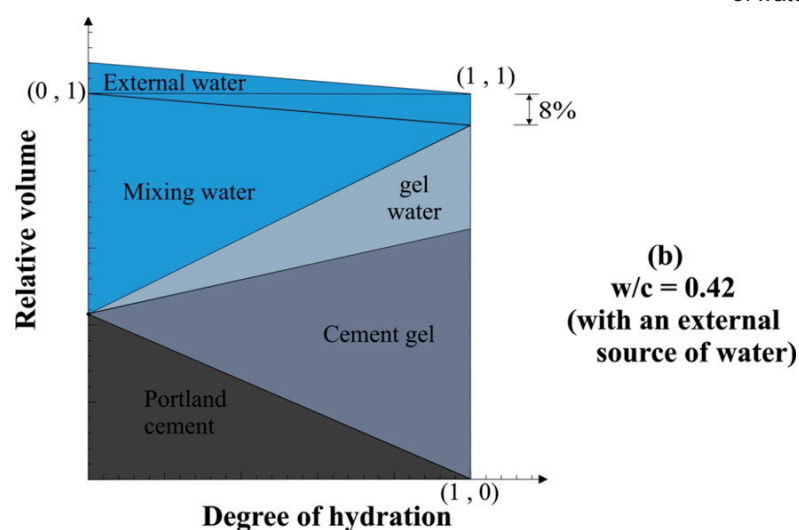
Fig. 4. Schematic representation of the hydration of a 0.42 cement paste in a closed system.

objętości względnej.

#### 2.2.2.2. Hydratacja tego samego zaczynu pod wodą

Gdy ten sam zaczyn cementowy twardnieje pod wodą woda migruje do zaczynu wypełniając pory utworzone przez te reakcje chemiczne [rysunek 5], a więc nie powstają meniski w hydratyzującym zaczynie. W konsekwencji nie ulega on skurczowi. W tym przypadku gdy pełna hydratacja zostanie osiągnięta zaczyn zawiera pewną ilość wody, która wypełniła pory utworzone przez kontrakcję chemiczną zaczynu cementowego.

Zachodzi pytanie: czy nie użyć tej wody, która wniknęła do zaczynu, do hydratacji pewnej ilości cementu?



Rys. 5. Schemat hydratacji zaczynu cementowego z  $w/c = 0,42$ , z zewnętrznym źródłem wody.

Fig. 5. Schematic representation of the hydration of a  $w/c$  0.42 cement paste benefiting from an external source of water.

the large capillaries is formed. Menisci appear in these capillaries, but as they have a large diameter they do not generate large stresses that will result in a significant contraction of the apparent volume.

#### 2.2.2.2. Hydration of the same paste under water

When the same cement paste hardens under water, water penetrates within the paste to fill the porosity created by this chemical contraction (Figure 5) and no menisci are formed within the hydrating cement paste. As a consequence its apparent volume does not shrink. In such a case when full hydration is reached the paste contains a certain amount of water that has filled the porosity created by the chemical contraction of the cement paste

A question then arises: why not to use this water that penetrates within the paste to hydrate an additional amount of cement?

#### 2.2.2.3. Hydration of a cement paste having a $w/c$ equal to 0.36 that hardens under water

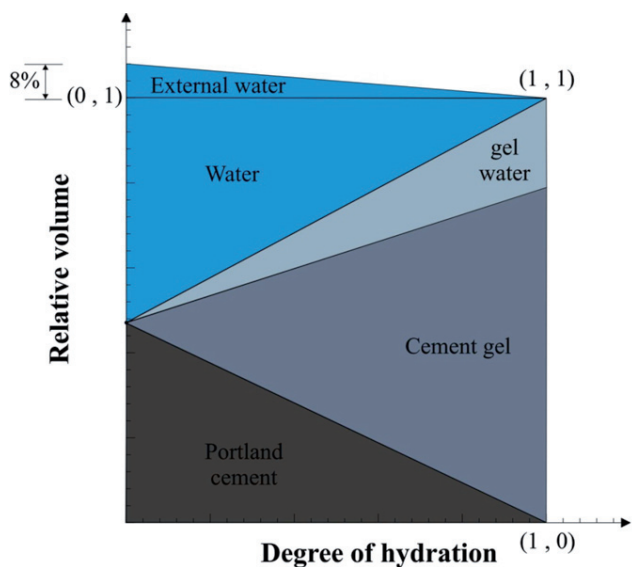
Jensen and Hansen (7) have found that when a cement paste having a  $w/c$  equal to 0.36 is cured under water it ends up as a non-porous material at the end of the hydration process, as seen in Figure 6.

#### 2.2.2.4. Hydration of a cement paste having a $w/c$ equal to 0.60

Such a system contains much more water than necessary to fully hydrate the Portland cement it contains. At the end of the hydration process there is a porosity created by the chemical contraction full of water vapour and the capillary water that has not been combined remained (Fig. 7) and offers an easy way for aggressive ions to penetrate into the concrete. The greater the  $w/c$  ratio, the greater the amount of remaining capillary water and the larger the capillary pores. Such a concrete exhibits very poor durability when exposed to severe environmental conditions because aggressive ions can penetrate very easily into the concrete through this open large capillary system.

#### 2.2.2.5. Hydration of a cement paste having a $w/c$ equal to 0.30 in a closed system

Such a system does not contain enough water to fully hydrate all of the cement. The hydration reaction stops through lack of water as seen in Fig. 8. At the end of the hydration process, the unreacted parts of the cement particles act as very hard and rigid solid filler that strengthen the hardened cement paste.



Rys. 6. Schemat zaczynu cementowego z  $w/c = 0,36$  z zewnętrzną wodą.

Fig. 6. Schematic representation of the hydration of a cement paste having a  $w/c$  ratio equal to 0.36 benefitting from an external source of water.

### 2.2.2.3. Hydratacja pod wodą zaczynu cementowego z $w/c = 0,36$

Jensen i Hansen (7) stwierdzili, że gdy zaczyn cementowy o  $w/c = 0,36$  hydratyzuje pod wodą tworzy na końcu procesu nieporowaty materiał, jak to pokazano na rysunku 6.

### 2.2.2.4. Hydratacja zaczynu cementowego o $w/c = 0,60$

Taki układ zawiera znacznie więcej wody niż potrzeba do pełnej hydratacji cementu portlandzkiego w nim zawartego. Na końcu procesu hydratacji zawarte są w zaczynie pory spowodowane kontrakcją chemiczną pełne pary wodnej oraz woda w kapilarach pozostała nie potrzebna do hydratacji [rysunek 7]. Stwarza to łatwy dostęp dla roztworów z agresywnymi jonami do wnętrza betonu. Im większy stosunek  $w/c$  tym większa ilość wody w kapilarach i tym większe pory kapilarne. Taki beton ma bardzo małą trwałość w trudnych warunkach ekspozycji, ponieważ agresywne roztwory mogą łatwo migrować do jego wnętrza przez duży, otwarty układ kapilar.

### 2.2.2.5. Zaczyn cementowy z $w/c = 0,30$ , hydratyzujący w układzie zamkniętym

Ten układ nie ma dosyć wody do pełnej hydratacji cementu. Hydratacja ustaje w związku z brakiem wody jak to pokazano na rysunku 8. Na końcu procesu hydratacji nieprzereagowana część cząstek cement odgrywa rolę bardzo twardego wypełniacza, co wzmacnia stwardniały zaczyn.

**$w/c = 0.36$   
(with an external source of water)**

### 2.2.2.6. Hydration under water of a paste having a $w/c$ ratio equal to 0.30

In Fig. 9 it is seen that we end up with a non-porous solid that does not shrink since as soon as the volumetric contraction creates some porosity this porosity is filled with water that hydrates some additional cement with an increase of the absolute volume of the paste, because this water is external to the initial system.

## 3. Curing of low $w/c$ concrete

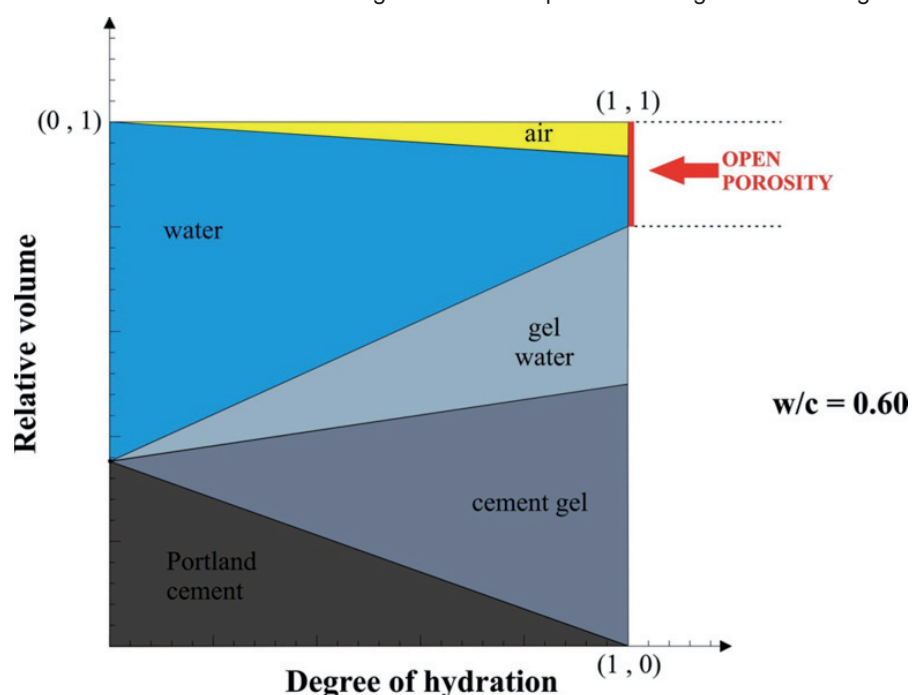
### 3.1. General considerations

In order to take advantage of the elimination of the presence of a large capillary network that exist in normal strength concrete when using low  $w/c$  concrete to increase concrete durability it is very important to take care properly of the physical consequence of the chemical contraction which develops a very fine

porosity within the hydrated cement paste as soon as its hardening restrains this physical contraction.

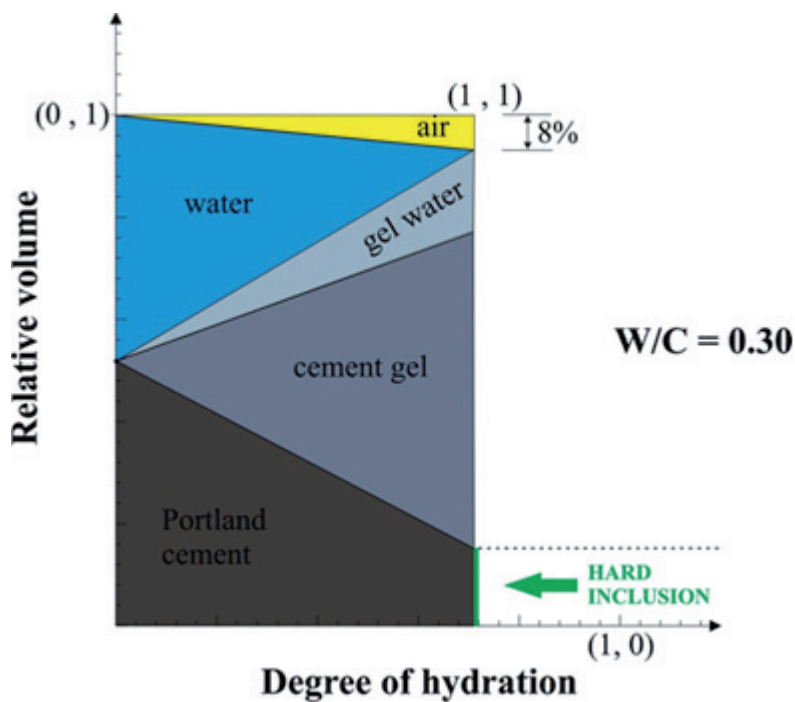
When no external water (external to the paste) is provided during hydration menisci are appearing within the hardening cement paste in very fine capillaries; these menisci create tensile stresses so that the hydrating cement (and the concrete) start to shrink very rapidly. The apparition of the porosity related to chemical contraction is called self-desiccation and the resulting shrinkage, autogenous shrinkage.

The lower the  $w/c$  ratio the faster and the greater the development of this shrinkage. If the development of autogenous shrinkage is



Rys. 7. Zaczyn cementowy o  $w/c = 0,60$ , hydratyzujący w powietrzu.

Fig. 7. Schematic representation of the hydration of an air-cured 0.60 cement paste.



Rys. 8. Zaczyn cementowy o  $w/c = 0,30$ , hydratyzujący w układzie zamkniętym.

Fig. 8. Schematic representation of the hydration of a 0.30 cement paste hydrating in a closed system.

#### 2.2.2.6. Hydratacja pod wodą zaczynu z $w/c$ 0,30

Na rysunku 9 pokazano, że hydratacja cementu w tych warunkach daje nieporowaty zaczyn, który nie wykazuje skurczu, ponieważ pory utworzone w wyniku kontrakcji zostają wypełnione wodą. Powoduje ona hydratację pewnej dodatkowej ilości cementu, ze zwiększeniem bezwzględnej objętości zaczynu, bowiem woda ta pochodzi z poza początkowego układu.

### 3. Pielęgnacja betonu o małym $w/c$

#### 3.1. Rozważania ogólne

W celu wykorzystanie zalety polegającej na usunięciu więzby dużych kapilar w betonie o małym  $w/c$  aby zwiększyć jego trwałość, a które występują w betonie o zwykłej wytrzymałości, zasadnicze znaczenie ma docenianie konsekwencji fizycznych chemicznej kontrakcji. Powoduje ona powstanie mikroporów w zhydratyzowanym zaczynie cementowym, aż do okresu, w którym stopień jego stwardnienia ograniczy tę kontrakcję.

Gdy nie dostarczymy wody z zewnątrz podczas hydratacji powstaną meniski w twardniejącym zaczynie w tych mikroporach. Meniski te wywołają naprężenia rozciągające co spowoduje bardzo szybko zachodzący skurcz twardniejącego zaczynu, a także betonu. Powstawanie porowatości związanej z kontrakcją chemiczną nazywa się samo-suszeniem, a występujący skurcz skurczem autogenicznym.

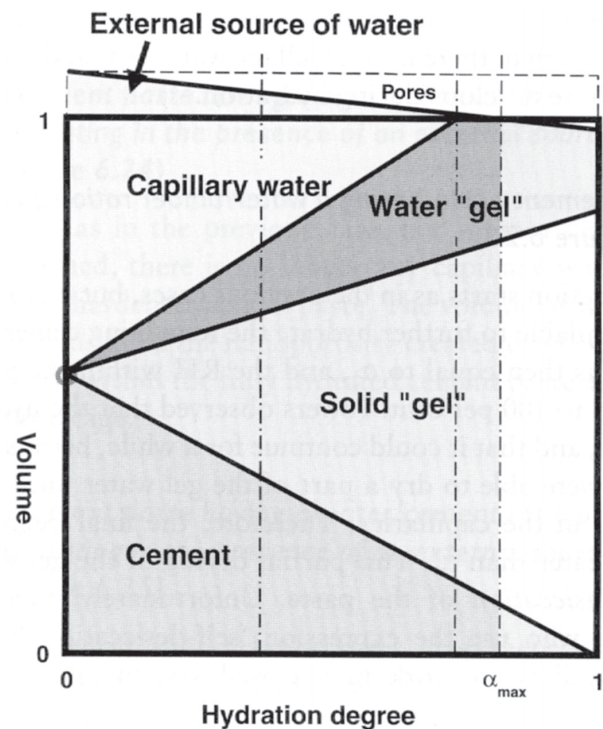
Im mniejszy jest stosunek  $w/c$  tym szybszy i większy jest ten skurcz. Gdy postęp skurczu autogenicznego nie jest kontrolowany, wówczas w betonie zaczynają bardzo szybko powstawać

not controlled, concrete starts cracking very rapidly and the very dense low  $w/c$  ratio concrete become very rapidly a very dense concrete in between cracks, which is not good for durability.

Many engineers believe that autogenous shrinkage is a new type of shrinkage occurring only in low  $w/c$  concrete. It is not true: autogenous shrinkage develops in any concrete whatever its  $w/c$  is because it is a consequence of hydration reaction when this hydration occurs in the absence of an external source of water, but it is negligible (in comparison to drying shrinkage) in high  $w/c$  concrete because initially the menisci are developed in large capillaries and therefore develop negligible tensile stresses (Davis 1930, Lynam 1934).

From a theoretical point of view, it is very easy to eliminate autogenous shrinkage: it is only necessary to provide an external source of water to the paste during its hydration. In that case, as soon as the very fine porosity created by the chemical contraction appears, it is immediately filled by this external water, therefore no menisci are appearing in the hydrating cement paste and no tensile stresses are generated by these menisci within the cement paste. Even as found by Le Chatelier in isothermal conditions, the hydrated cement paste will swell a little and, in quasi adiabatic conditions, this swelling will be more significant as found by Duran-Herrera.

It is easier to write how to eliminate autogenous shrinkage than to do it practically because as hydration proceeds the hydrated cement paste becomes denser and denser and the initial open



Rys. 9. Hydratacja pod wodą zaczynu cementowego o  $w/c = 0,30$ .

Fig. 9. Hydration under water of a cement paste having a  $w/c$  ratio equal to 0.30.

rys i o małym stosunku w/c beton zamienia się w zwarty beton pomiędzy spękaniem, co nie jest dobre dla trwałości.

Znaczna część inżynierów uważa, że skurcz autogeniczny jest nowym rodzajem skurczu, występującym tylko w betonie o małym w/c. Nie jest to prawdą: skurcz autogeniczny występuje w każdym betonie niezależnie od jego stosunku w/c, ponieważ jest on wynikiem przebiegu hydratacji w przypadku braku zewnętrznego źródła wody, jednak jest on pomijalnie mały [w porównaniu ze skurczem suszenia] w betonach o dużym w/c, ponieważ początkowo meniski powstają w dużych kapilarach i powodują pomijalne naprężenia rozciągające (Davis 1930, Lynam 1934).

Z teoretycznego punktu widzenia skurcz autogeniczny można bardzo łatwo wyeliminować; trzeba tylko zapewnić zewnętrzne źródło wody dla zaczynu podczas hydratacji. W tym przypadku jak tylko powstaną bardzo małe pory spowodowane kontrakcją chemiczną, zostają one natychmiast wypełnione wodą z zewnętrznego źródła, w związku z czym nie tworzą się meniski w hydratyzującym zaczynie cementowym. Nie powstają także naprężenia rozciągające w tym zaczynie. Nawet jak to stwierdził Le Chatelier w warunkach izotermicznych, zhydratyzowany zaczyn cementowy ulegnie nieznacznej ekspansji, a w quasi adiabatycznych warunkach ta ekspansja będzie nieco większa, jak to wykazał Duran-Herrera.

Łatwiej jest pisać jak wyeliminować skurcz autogeniczny niż osiągnąć to w praktyce ponieważ w trakcie postępującej hydratacji hydratyzujący cement staje się coraz bardziej zbitą i początkowa porowatość otwarta traci ciągłość w związku z czym potrzebna woda zewnętrzna nie może zbliżyć się do wszystkich reagujących cząstek cementu. Doświadczenie uczy, że zapewnienie pielęgnacji wodnej w przypadku betonu o w/c 0,35, to zewnętrzne źródło wody nie wnika głębiej do betonu niż 50 mm. Jednak ta powierzchniowa penetracja zewnętrznej wody jest bardzo ważna gdyż zgadza się zwykle z pierwszym rzędem prętów zbrojeniowych i zabezpiecza je przed agresywnymi roztworami zbitą i nie popękaną otuliną betonową.

W celu zapewnienia jednakowego zewnętrznego źródła wody jest możliwe wprowadzenie tego źródła wody do wnętrza betonu podczas wytwarzania mieszanki betonowej. Można to obecnie przeprowadzić dwoma metodami: lekkie kruszywo częściowo zastępujące kruszywo konwencjonalne lub dodawanie super-adsorbujących polimerów, analogicznych do stosowanych w dziecięcych kolorowankach. Ten rodzaj wodnej pielęgnacji nazywany jest pielęgnacją wewnętrzną co oznacza, że woda jest dodawana w trakcie produkcji mieszanki, jednak w trakcie hydratacji ta woda dostarczana do zaczynu jest zewnętrzną. W przypadku stosowania nasyconego kruszywa lekkiego duże znaczenie ma porowatość tego kruszywa, którego porowatość powinna się składać z większych porów od tych powstałych w wyniku kontrakcji, co będzie ułatwiać hydratyzującemu zaczynowi zasysanie tej wody z lekkiego kruszywa. Lekkie kruszywa zawierające zbyt małe pory nie będą jej oddawać hydratyzującemu cementowi. Doświadczenie uczy, że dodanie odpowiednio nasyconego lekkiego kruszywa

porosity of the paste becomes fragmented so that the necessary external water cannot reach all the hydrating cement particles. Experience shows that when providing external water curing to a 0.35 w/c concrete, this external water does not penetrate more than 50 mm within the concrete. However, this superficial penetration of this external water is very important because usually it corresponds to the depth of the first rank of reinforcing steel and it is very important to protect it from aggressive agents with a dense and un-cracked concrete cover.

In order to provide a uniform source of external water to the cement paste, it is possible to incorporate this external source of water (for the paste) within the concrete during its batching. Presently, it can be done in two different ways: through the use of some water saturated lightweight aggregates as partial replacement of conventional aggregates or the use of super absorptive polymers (SAP) as the ones used in baby diapers. This type of water curing is called internal curing meaning that the water is included within the concrete during its batching; but during hydration this water provided to the paste is external to it. When using saturated lightweight aggregates it is very important that the porosity of the lightweight aggregates be composed of larger capillaries than the ones generated by the chemical contraction so that it will be easy for the hydrating paste to suck the water contained in the lightweight aggregates. Lightweight aggregates having a too fine porosity will never be able to be depleted from their water by the hydrating cement paste.

When introducing appropriate saturated lightweight aggregates in the mix, experience shows that it is not possible to eliminate totally the development of its autogenous shrinkage but to decrease it drastically so that it will not generate any damageable early cracking.

### **3.2. Developing an appropriate water curing strategy in the field**

As previously said, low w/c concretes are produced using very few water so that they are very sensitive to plastic shrinkage because they are never covered by any bleeding water. When it is possible, it is always beneficial to place them at night in order to avoid sun exposure but in any case, it is imperative to systematically saturate the ambient air over the exposed concrete surface with fog nozzles as the ones used in nurseries for growing flowers as seen in Figure 10. These fog nozzles are particularly convenient: they are not expensive and are very efficient. A small pump even can increase the incoming pressure in order to provide finer fog droplets.

As soon as possible, an **evaporation retarder** (not a curing membrane) must be applied on the surface of the concrete in order to eliminate the risk of seeing some water evaporating from the freshly cast surface as seen in Figure 11. Evaporation retarders are aliphatic alcohols that form a mono-molecular impervious film that stays on the surface of the concrete because it has a lower density than water. Later on, the film will be washed away when direct water curing will be applied when the concrete surface will be hard enough.





Rys. 10. Zapobieganie skurczowi plastycznemu za pomocą pielęgnacji mgłą.

Fig. 10. Fogging to prevent plastic shrinkage.

do mieszanki nie pozwala na całkowitą eliminację skurczu autogenicznego, lecz powoduje jego znaczne zmniejszenie, w takim stopniu, że nie spowoduje ono niszczącego wczesnego skurczu.

### 3.2. Zastosowanie odpowiedniej strategii pielęgnacji wodnej na budowie

Jak wcześniej wspomniano, betony z małym stosunkiem w/c produkuje się z bardzo małym dodatkiem wody w związku z czym są one bardzo czułe na skurcz plastyczny ponieważ nigdy ich powierzchnia nie jest pokryta wodą, związaną z wydzielaniem mlecza. Betonowanie nocą jest zawsze bardzo korzystne, o ile tylko można go zastosować, w celu uniknięcia słonecznego nagrzewania, jednak w każdym przypadku należy bezwzględnie nawilżać systematycznie powietrze atmosferyczne ponad powierzchnią ułożonego betonu za pomocą dysz tworzących mgłę, takich samych jak stosuje się w szklarniach z rosnącymi kwiatami, co pokazano na rysunku 10. Te dysze mgielne są szczególnie przydatne, nie są drogie, a bardzo wydajne. Nawet mała pompa może zwiększyć ciśnienie zasilające w celu większego rozdrobnienia kropelek mgły.

Tak szybko jak to tylko jest możliwe należy zastosować **opóźniacz parowania**, lecz nie folię pielęgnacyjną, w celu usunięcia ryzyka większego parowania wody z powierzchni świeżo ułożonego betonu jak to pokazano na rysunku 11. Opóźniacze parowania są alkoholami alifatycznymi, które tworzą mono-molekularną warstewkę pozostającą na powierzchni betonu, bowiem ma ona mniejszą gęstość od wody. Później warstewka ta zostanie splukana gdy zostanie zastosowana bezpośrednia pielęgnacja wodna, po osiągnięciu przez powierzchnię betonu wystarczającej twardości.

**Ważne znaczenie ma nie stosowanie folii pielęgnacyjnej na powierzchni betonu, co niestety jest często stosowane, ponieważ folia będzie stanowiła barierę dla zewnętrznej wody, którą trzeba będzie podawać na powierzchnię betonu, gdy będzie ona wystarczająco twarda, aby wytrzymać bezpośrednią pielęgnację wodną.** Do tej pielęgnacji wodnej będzie można najpierw zastosować węże, jak to pokazano na rysunku

It is very important to insist that it is not a curing membrane that has to be applied at the surface of the concrete (which unfortunately is done quite often) because this membrane will constitute a barrier to the external water that will have to be applied to the concrete surface when it will be hard enough to support direct water curing. This external water curing will be done, first, with hoses as seen in Fig. 11 and then through the use of a saturated geotextile (not jute burlaps that do not accumulate enough water).

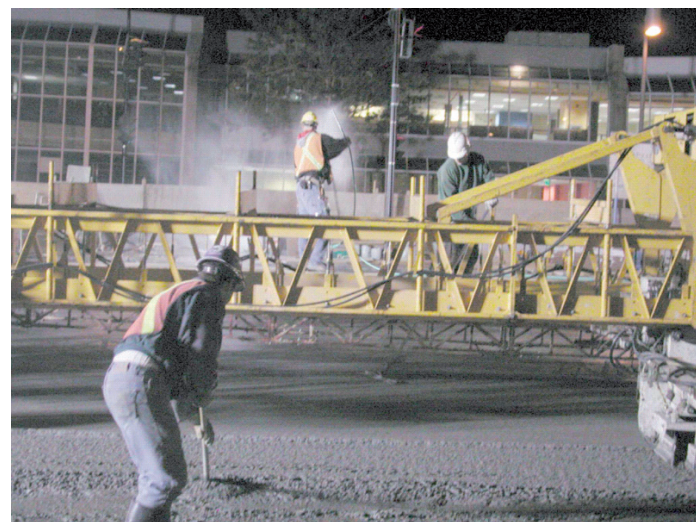
Usually when applying systematically this curing strategy, it is possible to control the cracking of low w/c concretes. (Morin et al. 2002). Of course, internal water curing provides a greater assurance against early cracking of low w/c concretes.

*As previously said, this curing strategy must be applied over large exposed surface like bridge decks but is it necessary to water cure low w/c concrete columns?*

There is still some controversy on this subject. Personally, I have never seen a cracked low w/c concrete column in my life but I continue to promote their water curing. In fact, as the top of these columns is not restrained, columns built with a low w/c concrete act as a non-restrained linear element and they shorten freely without cracking. However, their water curing improves the impermeability of their skin which is their most vulnerable part when they are exposed to a **very harsh environment**; this is why I recommend their water curing.

## 4. Enforcing such a curing strategy

Experienced engineers will think that this water curing strategy is a dream of a University professor and that it is impossible to enforce it in the field because up to now contractors are not used to water cure concrete. No it is not a dream, because it is easy to motivate contractors to water cure concrete: it is only necessary to make



Rys. 11. Rozpylanie opóźniacza parowania na świeżą powierzchnię betonową.

Fig. 11. Spraying an evaporation retarder on the surface of the fresh concrete.

11, a następnie nasyconą wodą geo-włókniną, a nie grubą jutą, która gromadzi za mało wody.

Systematyczne stosowanie tej strategii pielęgnacji pozwala zwykle na kontrolę procesów wywołujących powstawanie spękań betonów o małym stosunku w/c (Morin i in. 2002). Oczywiście wewnętrzna pielęgnacja wodna daje większą pewność zabezpieczenia przed powstawaniem wczesnych rys w betonach o małym w/c.

*Jak to wcześniej stwierdzono tę strategię pielęgnacji należy stosować na dużych powierzchniach betonu, a mianowicie na pomostach mostów, jednak czy trzeba pielęgnować z użyciem wody podpory mostowe?*

Są na ten temat pewne kontrowersje. Osobiście, nigdy nie widziałem popękanej podpory z betonu o małym w/c, jednak ja zalecam ich pielęgnację wodną. W rzeczywistości w górnej części podpór zapewniony jest skurcz swobodny, więc podpory wykonane z betonu o małym w/c pracują jako elementy liniowe i ulegają skróceniu bez powstawania spękań. Jednak ich pielęgnacja wodna zmniejsza przepuszczalność warstw zewnętrznych, które są najwrażliwszą częścią w przypadku poddania działaniu **agresywnego środowiska**; z tego powodu ja zalecam ich pielęgnację wodną.

#### 4. Przymusowe wprowadzanie strategii pielęgnacji

Inżynierowie z dużym doświadczeniem będą zdania, że taka strategia wodnej pielęgnacji jest marzeniem uniwersyteckiego profesora i nie jest możliwa do zastosowania jej na budowie ponieważ do chwili obecnej inwestorzy nie są przyzwyczajeni do wodnej pielęgnacji betonu. Nie jest to jednak marzenie i można łatwo przekonać inwestorów do wodnej pielęgnacji betonu: trzeba jedynie wykazać, że jest ona opłacalna. W tym celu trzeba zaproponować inwestorom aby policzyli oddzielnie każdy etap realizacji budowy, związany ze stosowaniem wodnej pielęgnacji (Morin i in. 2002). Inwestorzy nie będą przekonani, gdyż mają zysk bez wodnej pielęgnacji, trzeba jednak uzasadnić celowość skrupulatnego sprawdzenia kosztów związanych z tą pielęgnacją.



Rys. 12. Tak, im zapłacono za wodną pielęgnację betonu i starannie ją stosują.

Fig. 12. Yes, they are paid to water-cure concrete and they do it diligently.

water curing profitable. It is only necessary to ask contractors to charge separately each activity related to water curing (Morin et al. 2002). Contractors will become zealous because they are making a profit out of water curing, however, it is always wise to check that they are enforcing scrupulously this water curing.

The paper presented by Morin et al in Concrete International in 2002 received the Construction Practice Award from the American Concrete Institute. In that paper it is explained how this global curing strategy was implemented in a particular project to cast the decks of 25 viaducts rebuilt using 0.35 w/c concrete in downtown Montreal. Along the 13 km project a very careful inspection revealed only 13 very fine cracks essentially due to restrained deformations that were so fine that it was not necessary to inject them with epoxy.

#### 5. Use of expansive additives

Instead of providing an external and/or internal water curing, some researchers (Nagataki 1998, Collepardi 2005) are promoting the use of expansive admixtures to counteract the cracking effect of the initial autogenous shrinkage development. These expansive agents are either dead burned lime granules of a specific size that will be hydrating and expanding during the first two or three days following concrete placing and form portlandite crystals that will act as micro-jacks within the hydrating paste and cause its expansion or ettringite formed from the sulfo-aluminate granules.

It is not complicated to find the appropriate dosage of these granules to generate an expansion that will be equal to the anticipated autogenous shrinkage so that the apparent volume of the concrete element will not shrink. This simple technic that is not particularly expensive works well in the field, but personally I do not recommend it for low w/c concretes exposed to very harsh environmental conditions.

#### 6. Conclusion

It is possible to build concrete structures with a low w/c ratio concrete that will not present any fissures if an appropriate curing strategy is enforced in the field. It is only necessary to provide a water saturated environment to the fresh concrete just after its casting in order to avoid the apparition of plastic shrinkage cracks and to water cure the concrete as soon as possible in order to control the development of autogenous shrinkage. Internal curing or the use of expansive agents can provide an additional insurance against early cracking. It is therefore very important to write very clear and detailed specifications as the ones used by the City of Montreal presented in the book of Aitcin and Mindess (2013) and to ask the contractors to give a price for each of the curing measures that have to be implemented. If water curing concrete becomes a source of profit for contractors, they become zealous; however, it is always good to pay inspectors to check them.

Artykuł opublikowany przez Morina i in. w *Concrete International* (2002) otrzymał nagrodę „Construction Practice” (wykonawstwo budowlane) Amerykańskiego Instytutu Betonu. W tym artykule wyjaśniono w jaki sposób zastosowano tę globalną strategię pielęgnacji w konkretnym wykonawstwie betonowania pomostów 25 przebudowywanych wiaduktów stosując beton o  $w/c = 0,35$ , na peryferiach Montrealu. Na pomostach o całkowitej długości 13 km staranna inspekcja wykazała tylko 13 bardzo małych rys, spowodowanych głównie ograniczeniem odkształceń, a miały one tak małe rozwarście, że nie było potrzeby wypełniać ich żywicą epoksydową.

## 5. Zastosowanie domieszek ekspansywnych

Zamiast stosowania zewnętrznej lub wewnętrznej pielęgnacji wodnej niektórzy naukowcy (Nagataki 1998, Collepardi 2005) proponują dodawanie domieszek ekspansywnych w celu przeciwdziałania powstawaniu spękań, spowodowanych skurczem autogenicznym. Te domieszki ekspansywne są albo martwo palonymi granulami wapna o tak dobranych wymiarach aby hydratyzowały i wykazywały ekspansję w pierwszych dwóch, trzech dniach po ułożeniu betonu i tworzyły ekspansywne kryształy portlandytu w hydratyzującym zaczynie, albo granulami siarczano-glinianów, wywołujących krystalizację ettringitu.

Łatwo można ustalić odpowiedni dodatek tych granul, które spowodują ekspansję równą co do wielkości zakładanemu skurczowi autogenicznemu, tak aby element betonowy nie wykazywał skurczu. Ta prosta technika, która nie jest kosztowna, może być stosowana na budowie, jednak ja osobiście jej nie polecam w przypadku betonu o małym  $w/c$ , narażonym na działanie agresywnego środowiska.

## 6. Wnioski

Można realizować konstrukcje betonowe z betonu o małym stosunku  $w/c$ , które nie będą miały rys jeżeli zastosuje się odpowiednią pielęgnację na budowie. Konieczne jest utworzenie środowiska nasyczonego wilgocią w otoczeniu świeżego betonu, bezpośrednio po jego ułożeniu, w celu wyeliminowania spękań wywołanych skurczem plastycznym i zastosować wodną pielęgnację tak szybko jak to tylko jest możliwe, w celu kontrolowania skurczu autogenicznego. Pielęgnacja wewnętrzna lub stosowanie domieszek ekspansywnych są dodatkowym zabezpieczeniem przed wczesnym występowaniem spękań. Jest więc bardzo ważne ustalić jasne i szczegółowe wytyczne, jak te zastosowane w Montrealu, opisane w książce Aïtcina i Mindessa (2013) i zobowiązać inwestorów aby podali koszty każdego z podjętych działań pielęgnacyjnych, które będą stosowane. Jeżeli pielęgnacja wodna będzie źródłem dochodów dla inwestorów, to zostanie ona wprowadzona; jednak jest zwykle dobrze płacić inspektorom, którzy będą prowadzili nadzór.

## Literatura / References

1. AÏTCIN P.-C., MINDESS S., (2011) *Sustainability of Concrete*, Spon Press, London, U.K., 301p.
2. BENTZ D. and AÏTCIN P.-C., (2008) The Hidden Meaning of the Water-to-Cement Ratio, *Concrete International*, Vol. 30, No. 5, pp 51-54.
3. COLLEPARDI, M., BORSOI, A., COLLEPARDI, J., OGOUMAH OLAGOT J.J. and TROLI, R. (2005) Effect on shrinkage reducing Admixtures in Shrinkage Compensating Concrete under non-wet Conditions, *Cement and Concrete Composite*, Vol.27, pp. 706-708.
4. DAVIS, R.E. (1930) A summary of the Results of Investigations having to do with Volumetric Changes in Cement, Mortars and Concretes, Due to causes other than stress, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.26, pp.407-443.
5. DURAN-HERRERA A., BONNEAU O., PETROV N., KAYAT K. H. and AITCIN P.-C. (2008) *Autogenous Control of Autogenous Shrinkage*, ACI SP-256 American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 1-12
6. FÉRET R., (1892) Sur la compacité des mortiers hydrauliques, *Annales des Ponts et Chaussées* Vol. 4, 2<sup>nd</sup> semestre, pp. 5-161.
7. JENSEN O. M., HANSEN P. E. (2001) A Model for the Microstructure of Calcium silicate Hydrate in Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, N 4, pp. 647-654.
8. LE CHATELIER H., (1904) *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, Dunod, Paris, 196p.
9. LYNAM C. G. (1934) *Growth and Movement in Portland Cement Concrete*, Oxford University Press, London, 139p.
10. MORIN R., HADDAD G, and AITCIN P.-C, (2002) Crack-free High Performance Concrete Structures, *Concrete International*, Vol. 24, N. 9, pp. 51-56.
11. NAGATAKI S. and GONI H. (1998) Expansive admixtures (Mainly ettringite) *Cement and Concrete Composite*, Vol.20, pp.704-708.
12. NEVILLE A.M., (2011) *Properties of Concrete*, 5th Edition, Prentice Hall, 846p.
13. POWERS T.C., (1968) *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley and Sons, New York, 664p.