

P.-C. Aïtcin and W. Wilson

Université de Sherbrooke, Canada

Cementy dzisiaj - betony jutra

Cements of today, concretes of tomorrow

Słowa kluczowe: beton wysokowartościowy, beton samozagęszczalny, beton ultra-wysokowytrzymały, reologia, zrównoważony beton.

Keywords: high performance concrete, self-compacting concrete, ultra-high strength concrete, rheology, sustainable concrete.

1. Wprowadzenie

W 2000 roku pierwszy z autorów opublikował w czasopiśmie *Cement and Concrete Research* artykuł zatytułowany „Cementy przeszłości – obecne betony przyszłości” (Aïtcin, 2000). Artykuł ten cieszył się dużym powodzeniem i został przetłumaczony na język francuski, niemiecki i włoski. Czternaście lat później, bardzo często korzysta z niego w internecie wielu czytelników.

Gdy pierwszy z autorów został poproszony przez profesora Kurdowskiego o przedstawienie kilku tendencji rozwojowych betonu przyszłości, przeczytał ponownie ten artykuł i stwierdził jak dobrze jego przewidywania się sprawdziły. Podczas tej lektury autor równocześnie zdał sobie sprawę, że jego przewidywania były raczej zachowawcze, gdyż nauka i technologia betonu poczyniły znaczne postępy w ostatnich czternastu latach, w tempie szybszym od oczekiwanego. Postępy naukowe miały konsekwencje, które były nie do pomyślenia na przełomie wieku, zwłaszcza w dziedzinie reologii betonu.

W ostatnich latach XX wieku zaznaczył się postęp dotyczący wytrzymałości i trwałości betonu, z uwagi na zastosowanie superplastifikatorów (Aïtcin, 1998), natomiast pierwsze lata XXI wieku wyróżniły się postępowaniem związanym z opanowaniem reologii

1. Introduction

In 2000, the first author published in *Cement and Concrete Research Journal* a paper entitled “Cements of Yesterday and Today - Concrete of Tomorrow” (Aïtcin, 2000). This paper was quite successful and it was translated in French, German, and Italian. Fourteen years later, month after month, it is one of the two most downloaded papers of the Journal.

When the first author was asked by Professor Kurdowski to present some future developments in the domain of concrete, he read that paper again to see how good his predictions turned out to be. During this exercise, he realized that his predictions were rather conservative, as the science and technology of concrete had made considerable progresses during the last fourteen years, at a rate faster than expected. These scientific progresses had consequences that were unthinkable at the turn of the century, particularly in the domain of concrete rheology.

If the last years of the twentieth century were marked by the progresses made in the domain of compressive strength and durability due to the use of superplasticizers (Aïtcin, 1998), the first years of the twenty-first century can be characterized by the progresses made to master the rheology of concretes (Khayat and Feys, 2010). Thanks to these progresses, concrete is presently displacing steel

betonów (Khayat i Feys, 2010). Dzięki tym postępom, beton obecnie zastępuje stal w budowie budynków wysokościowych (Aitcin i Wilson, 2014), gdyż możliwa jest produkcja betonów wysokowartościowych (BWW), które praktycznie są samozagęszczające się i nie wymagają wibrowania w trakcie układania. Ponadto, betony samozagęszczające się mają takie właściwości reologiczne, że można je pompować do 600 m, a wkrótce do 1000 m.

2. Rozwój technologii betonu w ostatnich 45 latach

W latach sześćdziesiątych, betonem o największej wytrzymałości, jaki można było uzyskać był beton o wytrzymałości 30 MPa i opadzie stożka 100 mm, do chwili gdy John Albinger stwierdził, że poprzez bardzo staranny dobór dostępnych na rynku materiałów był w stanie dwukrotnie zwiększyć wytrzymałość na ściskanie (Anon, 1976; Albinger i Moreno, 1991). Rozwój właściwości betonu uzyskano dobierając najlepsze materiały metodą prób i błędów.

W celu wprowadzenia betonu o większej wytrzymałości na rynek John Albinger zastosował następujący fortel. Podczas budowy słupów o wytrzymałości 30 MPa w budynku wielopiętrowym, zapytał inżyniera i architekta o zgodę na zastosowanie słupów betonowych o wytrzymałości 40 MPa, **bez dodatkowych kosztów**. Jego propozycja została przyjęta. Następnego dnia nikt nie stwierdził różnicy pomiędzy betonem 40 MPa, a betonem 30 MPa, zastosowanym do budowy innych słupów.

Architekt był bardzo zadowolony widząc, że zmniejszenie rozmiarów słupów stało się możliwe, więc poprosił inżyniera o zaprojektowanie nowego wysokościowca z betonu 40 MPa. Inżynier uznał to za dobry pomysł, ponieważ zastosowanie betonu o wytrzymałości 40 MPa prowadziło do zmniejszenia ciężaru własnego budynku. Podczas budowy słupów o wytrzymałości 40 MPa, John Albinger ponownie wysunął propozycję i zapytał o zgodę na wybudowanie jednego słupa o wytrzymałości 50 MPa, **ponownie bez dodatkowych kosztów**. Ten sam pomysł został powtórzony dla betonu o wytrzymałości 60 MPa. Ostatecznie architekt i inżynierowie zdecydowali się wybudować ich następny wysokościowiec – Water Tower Place – stosując beton o wytrzymałości 60 MPa, w słupach na niższych piętrach. Wytrzymałość słupów stopniowo zmniejszono do 30 MPa, na najwyższych piętrach. Regulując zawartość stali zbrojeniowej inżynier był w stanie zachować ten sam przekrój poprzeczny wszystkich słupów w budynku, zatem ten sam zestaw gotowych form stalowych mógł być stosowany od pierwszego do ostatniego piętra. Ponadto, ponieważ wszystkie piętra miały ten sam kształt, wykończenie wewnątrz stało się powtarzalną operacją, prowadzącą do znacznych oszczędności. W związku z tym, w przeciągu zaledwie 3 lat, John Albinger zdołał dwukrotnie zwiększyć wytrzymałość na ściskanie betonów stosowanych w budowie dolnych słupów w wysokościowcach, w Chicago. Jednakże, uzyskany przez niego beton klasy 60 MPa miał konsystencję odpowiadającą opadowi stożka wynoszącego 100 mm, co przy układaniu powodowało konieczność stosowania intensywnej wibracji.

in the construction of high-rise buildings (Aitcin and Wilson, 2014) as it is possible to produce high performance concretes (HPC) that are practically self-compacting and do not need any vibration to be placed. Moreover, the formulation of these self-compacting concrete is robust enough so that they can now be pumped up to 600 m and very soon up to 1000 m.

2. The evolution of concrete during the last 45 years

During the sixties, the strongest concrete that could be made was a 30 MPa concrete having a slump of 100 mm, until John Albinger realized that by selecting very carefully the materials available on the market he was able to double the compressive strength (Anon, 1976; Albinger and Moreno, 1991). This development was done empirically; the best materials were selected by trial and error.

In order to introduce his stronger concrete onto the market, John Albinger used the following stratagem. During the construction of 30 MPa columns in a high-rise building, he asked the engineer and the architect permission to cast a 40 MPa concrete column **at no extra cost**. His proposal was accepted. The next day nobody noticed any difference between this 40 MPa concrete and the 30 MPa concrete used for the construction of the other columns.

The architect was very happy to see that it was possible to decrease the size of the columns, so he asked the engineer to design the next high-rise building with a 40 MPa concrete. The engineer liked this idea because the use of a 40 MPa concrete was decreasing the dead load of the building. During the construction of these 40 MPa columns, John Albinger repeated the same stratagem and asked permission to cast one 50 MPa concrete column, again **at no extra cost**. The same stratagem was repeated for a 60 MPa concrete. Finally the architect and the engineers decided to build their next high-rise building, The Water Tower Place, using a 60 MPa concrete for the columns of the lower floors. The compressive strength of the columns was then decreased progressively down to 30 MPa for the columns of the top floors. By adjusting the amount of reinforcing steel, the engineer was able to keep the same cross sectional area for all the columns of the building so that the same set of prefabricated steel forms could be used from the first to the last floor. Moreover, as all the floors had exactly the same geometrical pattern, interior finishing became a repetitive operation resulting in significant savings.

Therefore, within only three years, John Albinger succeeded to double the compressive strength of the concrete used to build the lower columns of high-rise buildings in Chicago. However, his 60 MPa concrete had a slump of 100 mm and necessitated a strong vibration to be placed.

At the end of the seventies, it was possible to simultaneously decrease the w/c and increase the slump due to the powerful dispersing properties of the superplasticizers. Compressive strengths were increased to 100 MPa, and even up to 150 MPa where very strong coarse aggregates could be found locally. These concretes could

Pod koniec lat siedemdziesiątych możliwe było jednoczesne zmniejszenie stosunku w/c betonu oraz zwiększenie opadu stożka, z uwagi na powodowanie bardzo znacznej dyspersji cementu w zaczynie, dzięki superplastyfikatorom. Wytrzymałość na ściskanie zwiększono do 100 MPa, a nawet do 150 MPa, w przypadku dostępności kruszyw grubych, o dużej wytrzymałości. Betony te miały opad stożka sięgający nawet 200 mm, bez występowania problemów związanych z wydzielaniem mlecza i segregacją, w związku z czym wibrowanie tych betonów w trakcie układania praktycznie nie było konieczne.

Jednakże, szybko zaobserwowano, że cementy spełniające te same normy wykazywały różną zgodność z superplastyfikatorami, gdy stosowano je do produkcji betonów o małym stosunku w/c. W celu określenia tych różnic we właściwościach zaczynu z różnych cementów z dodatkiem superplastyfikatora wprowadzono pojęcie zgodności (kompatybilności) tego układu. W tamtym czasie nie było możliwe wyjaśnienie, dlaczego cement mógł być zastosowany w betonie o małym stosunku w/c zdolnym do zachowania opadu stożka w czasie półtorej godziny, podczas gdy niemożliwe było dłuższe utrzymanie opadu stożka od 15 minut, przy zastosowaniu innego cementu spełniającego tę samą normę.

Początkowo problemy te były rozwiązywane metodą prób i błędów, ale bardzo szybko stało się oczywiste, że do zrozumienia i rozwiązania problemu wymagane jest podejście naukowe. W wyniku włożonego wysiłku w badania, mające na celu zrozumienie tych dziwnych zachowań, powstała prawdziwa „nauka o domieszkach”. Doświadczenia bardzo szybko wykazały, że rozdrobnienie cementu, zawartość C_3A (oraz w mniejszym stopniu zawartość C_3S) oraz rozpuszczalność różnych siarczanów zawartych w cemencie portlandzkim były kluczowymi czynnikami decydującymi o zgodności i trwałości zachowania właściwości układu cement/superplastyfikator. Jednakże należy odnotować, że czynniki te nie mają dużego wpływu na wyniki badań normowych, stosowanych do kwalifikacji cementów. Normy dotyczące cementu opierają się na różnych badaniach wykonywanych na zaczynie cementowym lub zaprawie, o dużym stosunku w/c (0,485 lub 0,50), bez dodatku domieszki. W takim zaczynie cementowym lub zaprawie ziarna cementu nie ulegają deflokulacji, co stwarza zupełnie inną sytuację niż w przypadku betonu o niskim stosunku w/c, w którym duży dodatek superplastyfikatora zapewnia deflokulację ziaren cementu.

W Japonii, gdzie koszty pracy są bardzo wysokie, profesor Okamura (1995) zdecydował się na opracowanie betonów, które mogłyby być układane bez wibrowania. Konieczne było uzyskanie w zasadzie płynnych betonów, o specyficznej reologii, uzyskiwanej poprzez stosowanie domieszek oraz zmianę stosunku zawartości kruszywa drobnego i grubego. Jak zwykle, składy betonów początkowo były optymalizowane metodą prób i błędów do chwili, gdy prawdziwa „nauka o reologii betonu” została rozwinięta na przełomie stulecia.

Równolegle do prac mających na celu ułatwienie układania betonu, niektórzy badacze pracowali nad rozwiązaniem innego problemu, zwiększenia wytrzymałości na ściskanie betonu powyżej 150

have slump as high as 200 mm without presenting any problem of bleeding and segregation, so that it was practically not necessary to vibrate these concretes during casting.

However, it was rapidly observed that cements fulfilling the same acceptance standards behaved differently with superplasticizers, when used to make concretes with low w/c ratios. The expressions “cement/superplasticiser compatibility” and “robustness of cement/superplasticiser combinations” were used to describe this strange behaviour. At that time, it was impossible to explain why a cement could be used to produce low w/c concrete able to maintain its slump during an hour and half, while it would be impossible to obtain a slump lasting more than 15 minutes using another cement meeting the same standards.

At the beginning, these problems were solved locally by trial and error, but rapidly it became evident that a scientific approach had to be used to understand and solve the problem. As a result of the research effort done to understand these strange behaviours, a true *science of admixture* emerged. Very rapidly the research showed that the cement fineness, the C_3A content (and to a lesser degree the C_3S content) and the solubility of the various sulfates found in Portland cement were the key factors governing the compatibility and robustness of cement/superplasticiser combinations. However, it must be noted that these factors do not have a great influence on the results used in standards for qualification of cements. Acceptance standards for cement are based on different tests done on a cement paste or mortar having a high w/c ratio (0.485 or 0.50) made without any admixture. In such cement paste or mortar, the cement particles are not deflocculated, a situation completely different from low w/c concrete where a high dosage of superplasticiser is used to deflocculate the cement particles.

In Japan, where labor costs are very high, Professor Okamura (1995) decided to develop concretes that could be placed without any vibration. It was necessary to develop almost fluid concretes having a specific rheology obtained with the use of admixtures and a change in the ratio of fine to coarse aggregate contents. As usual, the formulation of these concretes was first optimized by trial and error, until a true *science of concrete rheology* developed at the turn of the century.

In parallel to these efforts to facilitate placing of concrete, some researchers tried to solve another problem preventing the increase of concrete compressive strength beyond 150 MPa: the limited strength of the coarse aggregates. H. Bache (1981) from Alborg Cement in Denmark replaced ordinary aggregate by very strong small aggregates (porphyry, trap rock, calcined alumina, etc.) in order to obtain concretes having compressive strengths between 150 and 200 MPa. Pierre Richard (1994) from the Bouygues Company in France then decided to eliminate the coarse aggregates while decreasing further the w/c in order to make what he called *reactive powder concrete*, now known as *ultra-high strength concrete* (UHSC). This new type of concrete with a compressive strength greater than 200 MPa is currently used by architects happy to get rid of the massive shapes of concrete structures made with ordinary concrete.

MPa: granicznej wytrzymałości kruszywa grubego. H. Bache (1981) z Alborg Cement w Danii zastąpił zwykłe kruszywo bardzo wytrzymałym kruszywem drobnym (porfirem, skalami drobnopiękistymi, kalcynowanym tlenkiem glinu, itd.) w celu uzyskania betonów o wytrzymałości na ściskanie przypadającej pomiędzy 150 a 200 MPa. Następnie Pierre Richard (1994) z Bouygues Company we Francji podjął decyzję o usunięciu kruszywa grubego, przy dalszym zmniejszeniu stosunku w/c, w celu uzyskania, jak to nazwał, „betonu z reaktywnych proszków”, obecnie znanego jako beton ultra-wysokowytrzymały. Ten nowy rodzaj betonu o wytrzymałości na ściskanie większej od 200 MPa jest obecnie stosowany przez architektów, szczęśliwych z powodu możliwości pozbycia się masywnych kształtów konstrukcji betonowych, wykonanych z betonu zwykłego.

3. Dlaczego wytrzymałość na ściskanie betonu wzrasta wraz z obniżeniem stosunku w/c, nawet pomimo że ziarna cementu nie mogą w pełni ulec hydratacji?

Prawo Ferreta (1892) dla zaczynu cementowego oraz prawo Abrahama dla betonu uczy nas, że wytrzymałość na ściskanie zaczynów cementowych i betonów zależy od ich stosunku w/c. Im mniejszy stosunek w/c tym są one bardziej wytrzymałe. Bentz i Aitcin (2008) wykazali, że stosunek w/c pośrednio odzwierciedla średnią odległość pomiędzy ziarnami cementu, w chwili rozpoczęcia hydratacji zaczynu cementowego. Ponadto, doświadczenie pokazało, że im mniejsza odległość pomiędzy ziarnami cementu tym zaczyn cementowy jest bardziej wytrzymały, nawet jeśli nie ma wystarczającej ilości wody do pełnej hydratacji wszystkich ziaren cementu.

W celu zobrazowania tych zależności rozważmy prosty model dwuwymiarowy składający się z okrągłych ziaren cementu o promieniach a , które są rozmieszczone w każdym rogu kwadratu o długości boku $3a$, jak pokazano na rysunku 1. Najmniejsza odległość pomiędzy dwoma ziarnami cementu wzdłuż boku kwadratu wynosi a .

Obliczmy stosunek w/c modelowej „komórki elementarnej” w układzie, jaki przedstawiono na rysunku 2. Pole tej komórki wynosi $3a \times 3a = 9a^2$, a pole zajmowane przez ziarna cementu wynosi $4 \times \frac{1}{4} \pi a^2 = 3,14a^2$.

Przyjmijmy, że gęstość cementu wynosi 3,14 (wartość ta jest bardzo zbliżona do wartości rzeczywistej cementu portlandzkiego) oraz że $3,14^2$ wynosi 10 (dokładnie 9,86). Łatwo można wykazać, że stosunek w/c tej modelowej „komórki elementarnej” wynosi około 0,60, co odpowiada betonom o wytrzymałości 20 do 25 MPa.

$$w/c = \frac{9a^2 - 3,14a^2}{3,14 \cdot 3,14a^2} = \frac{9 - 3,14}{10} = 0,60$$

Umieśćmy, jak to pokazano na rysunku 3, dodatkowe kuliste ziarno cementu w środku komórki, której przekątna wynosi $4,24a$. Podobne obliczenia wykazują, że stosunek w/c nowej komórki wynosi

3. Why does concrete compressive strength increase with a decrease of the w/c ratio, even if cement particles cannot fully hydrate?

Ferret's law (1892) for cement paste and Abram's law for concrete taught us that the compressive strength of cement pastes and concretes depends on their w/c ratio. The lower the w/c the stronger they are. Bentz and Aitcin (2008) demonstrated that the w/c represents indirectly the average distance between the cement particles when a cement paste starts to hydrate. Moreover, experience showed that the closer these cement particles are, the stronger the cement paste is, even when there is not enough water to fully hydrate all the cement particles.

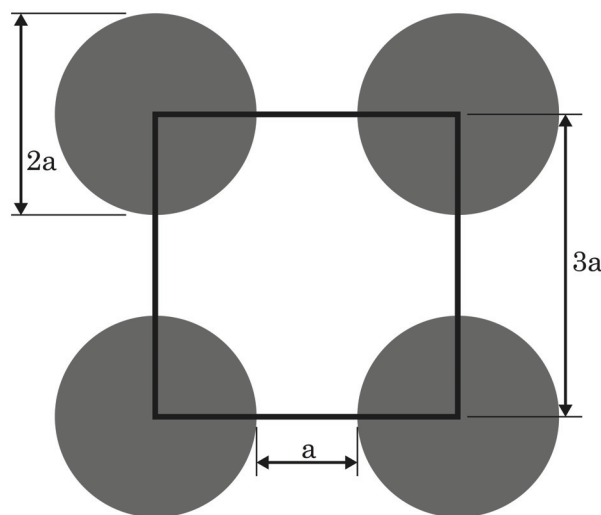
In order to illustrate this fact, let us consider a simple 2D model constituted of circular cement particles of radius a that are placed at each corner of a square having side length of $3a$, as shown in Figure 1. The shortest distance between two cement particles along the side of the square is a .

Let us calculate the water/cement ratio of the unit-cell of this system, as illustrated in Figure 2. The surface of this unit cell is $3a \times 3a = 9a^2$ and the surface occupied by the cement particles is $4 \times \frac{1}{4} \pi a^2 = 3,14a^2$.

Let us suppose that the specific gravity of the cement is 3.14 (which is quite close to that of an actual Portland cement) and that $3,14^2$ is equal to 10 (exactly 9.86). It is easy to show that the water/cement ratio of this unit cell around 0.60, which corresponds to a 20 to 25 MPa concrete.

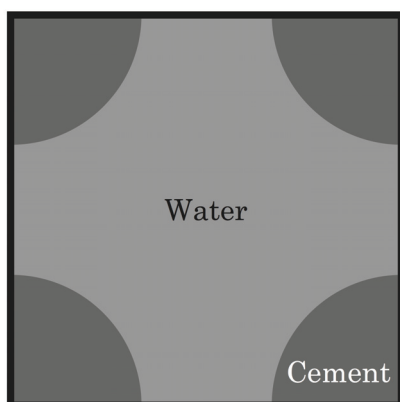
$$w/c = \frac{9a^2 - 3,14a^2}{3,14 \cdot 3,14a^2} = \frac{9 - 3,14}{10} = 0,60$$

Now, as shown in Figure 3, let us place another circular cement particle at the centre of the unit cell whose diagonal is $4,24a$ long.



Rys. 1. Model 2D zaczynu cementowego (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 1. 2D model of a cement paste (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)



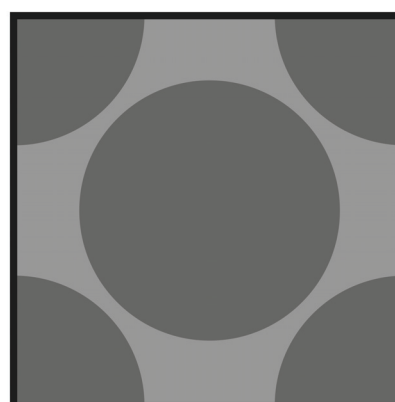
Rys. 2. Komórka elementarna z poprzedniego układu (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 2. The unit-cell of the preceding system. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

0,14 oraz, że minimalna odległość pomiędzy dwoma ziarnami cementu wzdłuż przekątnej wynosi $\frac{1}{2}(4,24a-4a)=0,12a$, to jest osiem razy mniej niż w poprzednim przypadku. Tak więc, poprzez zastąpienie wody w środku komórki przedstawionej na rysunku 2 ziarnem cementu, stosunek w/c zmniejsza się drastycznie, jak również minimalna odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi ziarnami cementu.

Rozważając pośrednie konfiguracje geometryczne możemy zaobserwować, że stosunek w/c jest bezpośrednio związany z minimalną odległością pomiędzy sąsiadującymi ziarnami cementu w zaczynie cementowym. Dlatego stosując superplastyfikator, który powoduje deflokulację ziarn cementu, możliwe jest rozmieszczenie ich bardzo blisko siebie, a w konsekwencji zmniejszenie w/c. Zaczyn cementowy staje się tak wytrzymały, że w niektórych przypadkach jest to wytrzymałość kruszywa grubego, które staje się najsłabszym ogniwem w betonie.

W rzeczywistości wytrzymałość na ściskanie betonu nie zależy od całkowitej hydratacji ziaren cementu, lecz podstawowym czynnikiem jest ich odległość. W betonie o stosunku w/c mniejszym od 0,42 hydratacja ustaje, gdy nie ma już wody do hydratacji ziaren cementu. Poniżej tej krytycznej wartości w/c = 0,42 bardzo drobne ziarna cementu mogą ulec całkowitej hydratacji, ale tylko



Rys. 3. Nowa komórka elementarna zawierająca ziarno cementu pośrodku 4 pokazanych na rys.1 ziaren (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

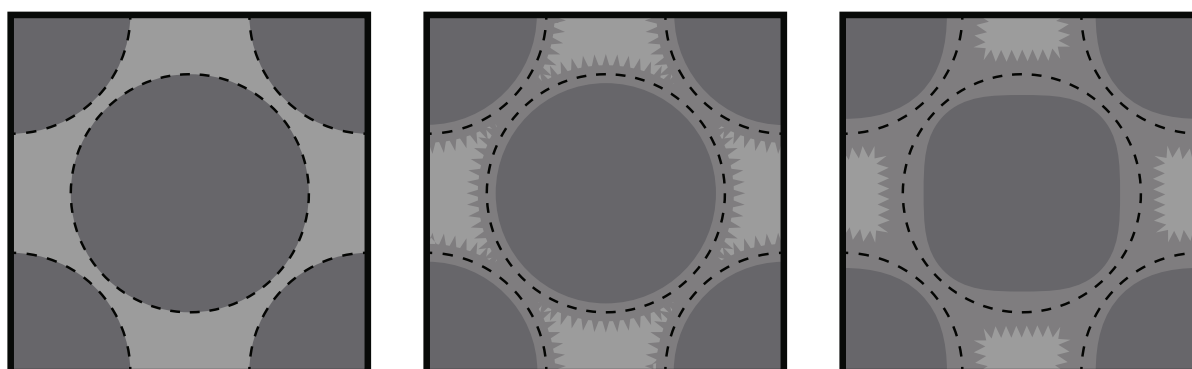
Fig. 3. New unit-cell containing a cement particle in the middle of the 4 previous ones. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

A similar calculation shows that the water/cement of this new unit-cell is 0.14 and that the minimum distance between two cement particles along the diagonal is $\frac{1}{2}(4,24a-4a)=0,12a$, that is 8 times shorter than in the previous case. Thus, by replacing the water at the centre of the unit-cell shown in Figure 2 by a cement particle, the water/cement decreases drastically as well as the minimum distance between two adjacent cement particles.

By considering intermediate geometrical configurations, we can observe that the water/cement is in direct relation with the minimum distance between adjacent cement particles in a cement paste.

Therefore, using a superplasticiser that defloculate cement particles it is possible to arrange them very close to each other and consequently to decrease the w/c. The cement paste is becoming so strong that in some cases it is the strength of the coarse aggregate that is becoming the weakest link in concrete.

In fact, concrete compressive strength does not depend on the full hydration of its cement particles but essentially on their closeness. In a concrete with a water/cement ratio lower than 0.42, the hydration stops when there is no more water to hydrate the cement particles. Below this critical value of w/c = 0.42, very fine cement particles can be fully hydrated but only the surface of the coarsest



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie hydratacji ziaren cementu portlandzkiego (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 4. Schematic representation of the hydration of Portland cement particles. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

powierzchnie największych ziaren są zhydratyzowane, ich środek pozostaje nieuwodniony (Granju i Maso, 1984), jak schematycznie pokazano na rysunku 4.

W bardzo gęstym zaczynie cementowym, w którym ilość wody dostępnej do hydratacji jest mała, hydraty powstające na powierzchni każdego ziarna cementowego mają małą odległość do wzrostu i utworzenia wiązań z hydratami powstającymi na sąsiednich ziarnach cementu. Ponadto, w stwardniałym zaczynie cementowym, nieuwodnione jądra ziaren klinkieru cementowego działają jak twarde inkluzje o bardzo dużej wytrzymałości na ściskanie i bardzo wysokim module sprężystości, co prowadzi do powstawania efektu wzmacniającego.

Taki sam efekt występuje w przypadku wprowadzenia drobnych cząstek szkła o podobnej wielkości jak ziarna cementu. Stwierdzono, że zastąpienie części cementu cząstkami niereaktywnego szkła prowadzi do zwiększenia wytrzymałości na ściskanie betonu ultra-wysokowytrzymałego o 20%, co można wyjaśnić jako efekt wzmocnienia przez bardzo twarde i sztywne cząstki szkła (Soliman et al., 2014). Jak pokazano na rysunku 5 cząstki szkła są całkowicie otoczone zaczynem cementowym i dlatego mogą spełniać rolę twardych wtrąceń wzmacniających matrycę cementową.

4. Betony o małym w/c lepiej spełniają zasady zrównoważonego rozwoju niż betony zwykłe

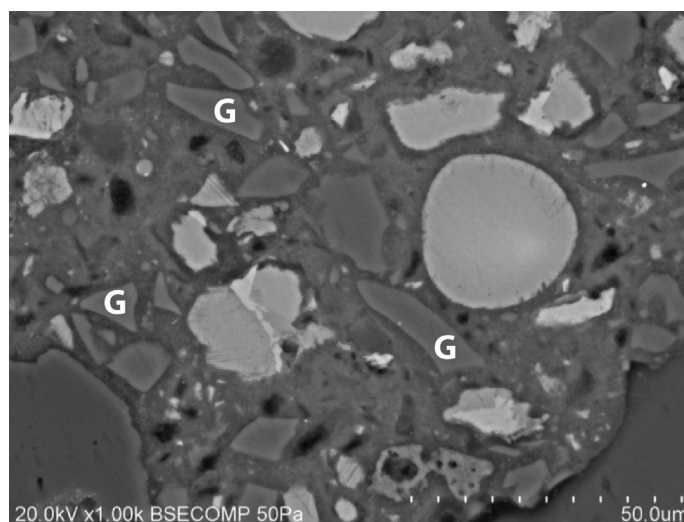
Duże znaczenie ma zmniejszenie emisji dwutlenku węgla związanego z produkcją betonu do wytwarzania konstrukcji. Wykażmy zatem zasadniczą zaletę betonów o małym stosunku w/c (Aïtcin i Mindess, 2011). W tym celu rozważmy dwa słupy o przekroju kwadratowym z betonu niezbrojonego, pod obciążeniem osiowo ściskającym L ; jednego wykonanego z betonu 25 MPa, a drugiego z betonu 75 MPa, pokazanych na rysunku 6.

Budując słup z betonu 25 MPa:

- konieczne jest wyprodukowanie, przetransportowanie i ułożenie 3 razy więcej betonu niż w przypadku słupa 75 MPa (przekrój poprzeczny jest 3 razy większy);
- konieczne jest zużycie około 300 kg cementu portlandzkiego na metr sześcienny betonu do uzyskania projektowanej wytrzymałości 25 MPa; 9 razy z 10 (w rzeczywistości, zawartość cementu zależy od odchylenia standardowego przy produkcji betonu, ale chcielibyśmy zostać przy zaokrąglonych liczbach), w porównaniu do typowego zużycia około 450 kg cementu wieloskładnikowego do wykonania betonu 75 MPa (z kilkoma litrami superplastyfikatora).

W konsekwencji, stosując tylko 1,5 razy więcej spoiwa w betonie 75 MPa, otrzymana wytrzymałość jest 3 razy większa. Dlatego, słup z betonu 75 MPa przenosi projektowe obciążenie L zużywając połowę cementu.

Z drugiej strony, stosowanie betonu konwencjonalnego wymaga 2 razy więcej cementu, 3 razy więcej kruszywa oraz większych kosztów transportu i ułożenia 3 razy większej ilości betonu. To



Rys. 5. Zaczyn cementowy betonu ultra-wysokowytrzymałego, zawierający cząstki szkła (G) (Dzięki uprzejmości Prof. Arezki Tagnit-Hamou i Nancy Soliman)

Fig. 5. Cement paste of a UHSC containing glass particles (G). (Courtesy of Professor Arezki Tagnit-Hamou and Nancy Soliman)

particles are hydrated, their centre remains anhydrous (Granju and Maso, 1984) as shown schematically in Figure 4.

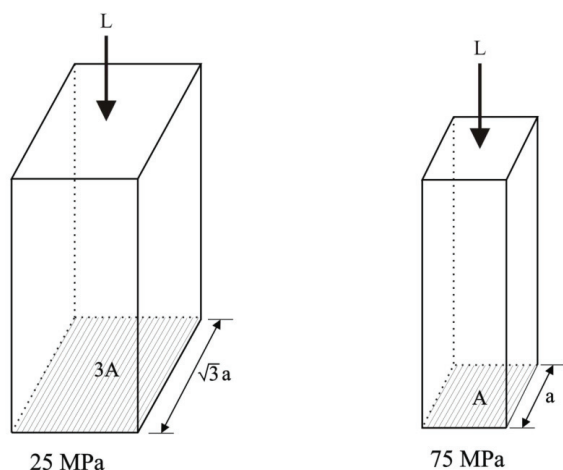
In a very dense cement paste where the amount of water available for hydration is low, the hydrates formed on the surface of each cement particle have a very short distance to grow to create mechanical bonds with the superficial hydrates grown from adjacent cement particles. Moreover, in the hardened cement paste, the anhydrous centers of the cement clinker particles act as hard inclusions having a very high compressive strength and a high elastic modulus, which leads to a strengthening effect.

The same effect is observed when introducing fine glass particles having similar sizes as cement particles. The substitution of a part of cement by non-reactive glass particles was found to increase the compressive strength of a UHSC by 20%, which may be explained by the strengthening effect of the very hard and stiff glass particles (Soliman et al., 2014). As shown in Figure 5, the glass particles are completely surrounded by the cement paste and can thus act as hard inclusions strengthening the cementitious matrix.

4. Low w/c concrete are more sustainable than ordinary concrete.

Now that it is very important to lower the carbon footprint of concrete structures, let us prove the fundamental advantage of low w/c concretes (Aïtcin and Mindess, 2011). The demonstration is based on a given compressive load L applied to two square unreinforced concrete columns, one built with a 25 MPa concrete and the second with a 75 MPa concrete, as shown in Figure 6.

When building the 25 MPa column:



Rys. 6. Porównanie dwóch niezbrojonych słupów z betonu o wytrzymałości 25 MPa i 75 MPa (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 6. Comparison of 25 MPa and 75 MPa unreinforced concrete columns. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

rozwiązanie nie tylko jest związane ze znacznie większą emisją dwutlenku węgla, ale również prowadzi do uzyskania słupa betonowego o gorszej jakości i trwałości. To spełnia znacznie gorzej zasady zrównoważonego rozwoju.

Te spektakularne oszczędności dotyczą tylko elementów pracujących na ściskanie, ale można także wykazać, że w przypadku elementów konstrukcyjnych pracujących na zginanie, takich jak belki i podłogi, znaczne oszczędności można uzyskać poprzez ich projektowanie z betonów o małym stosunku w/c. Natomiast w takich przypadkach lepiej zalecać stosowanie elementów sprężonych, wykonanych z betonu o małym stosunku w/c zamiast projektować je z betonu zwykłego, pracującego na zginanie (Clark, 2014).

Rozwiązaniem prowadzącym do jeszcze większego zmniejszenia emisji dwutlenku węgla związanego z produkcją betonu jest stosowanie cementów wieloskładnikowych zawierających znaczne ilości dodatków mineralnych, a ponadto wypełniaczy.

Wracając do naszego modelu 2D, na rysunku 7 pokazano modelową „komórkę elementarną” z wieloskładnikowego cementu zawierającego 25% dodatku mineralnego. Stosunek woda/spoiwo tej modelowej „komórki elementarnej” wynosi około 0,60 (w zależności od gęstości dodatku mineralnego), podobnie jak dla poprzedniego układu zawierającego tylko cement portlandzki bez dodatków (rysunek 2). Jednakże, stosunek w/c wzrósł do 0,79, ponieważ zawartość cementu portlandzkiego uległa zmniejszeniu i średnia odległość pomiędzy ziarnami cementu wzrosła.

Aby zrównoważyć niekorzystny wpływ zmniejszonej zawartości cementu na wczesną wytrzymałość na ściskanie, chemicy często modyfikują skład klinkieru w tych cementach wieloskładnikowych w celu uzyskania początkowej wytrzymałości cementu portlandzkiego bez dodatków.

Autorzy uważają, że podczas projektowania betonu z cementu wieloskładnikowego, zdecydowanie lepszym rozwiązaniem w celu

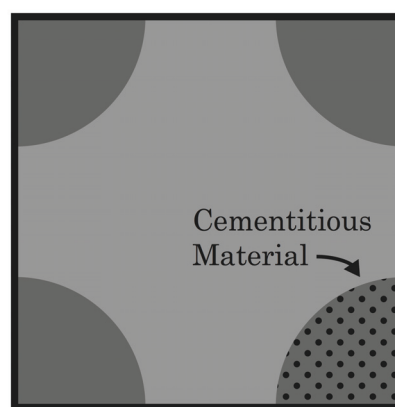
- it is necessary to produce, transport and place 3 times more concrete than for the 75 MPa column (the cross-section area is 3 times larger);
- it is necessary to use about 300 kg of Portland cement per cubic meter of concrete in order to get a 25 MPa design strength, 9 times out of 10 (in fact, the cement dosage depends on the standard deviation of the concrete production, but we would like to stay with round numbers), compared to the typical use of about 450 kg of a blended cement to produce a 75 MPa concrete (with some litres of superplasticiser).

Consequently, using only 1.5 times more binder in the 75 MPa concrete, the strength obtained is 3 times greater. Therefore, the 75 MPa column support the design load L with half the cement.

On the other hand, using conventional concrete requires 2 times as much cement, 3 times as much aggregates, and the transportation and placing of 3 times as much concrete. Not only this option generates a much higher carbon footprint, it also results in concrete column of poor quality and poor durability. This is absolutely unsustainable!

These spectacular savings concern only elements working in compression, but it can also be demonstrated that in the case of structural elements working in flexure such as beams and floors, significant savings can be achieved when designing them with a low water/cement concrete. But in these cases, it is better to promote the use of pre or post tensioned structural elements built with a low water/cement concrete rather than to design them with an ordinary concrete working in flexure (Clark, 2014).

A complimentary approach to decrease even further the carbon footprint of concrete structures is the use of blended cements containing substantial amounts of supplementary cementitious material or filler.



Rys. 7. Zaczyn cementowy o stosunku w/s i w/c, w którym 25% cementu portlandzkiego zostało zastąpione przez dodatek mineralny (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 7. Visual representation of the w/b and w/c of a cement paste in which 25% of Portland cement has been replaced by a supplementary cementitious material. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

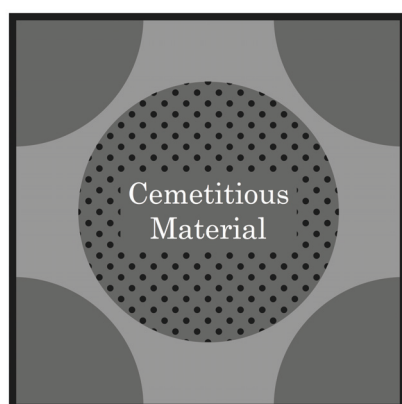
podwyższenia wytrzymałości początkowych jest zmniejszenie stosunku w/s (wytwarzając beton bardziej trwały) niż zmiana składu fazowego klinkieru.

Dla poparcia tego stwierdzenia powróćmy do naszego prostego modelu 2D i rozważmy tym razem bardziej zagęszczony zaczyn cementowy, w którym ziarno dodatku mineralnego zostało umieszczone pośrodku 4 ziaren cementowych, jak pokazano na rysunku 8. W tym przypadku modelowa „komórka elementarna” zawiera tyle samo ziaren dodatku mineralnego co ziaren cementu, więc zastąpienie części cementu portlandzkiego wynosi 50% i jest dwukrotnie większe w porównaniu do poprzedniego przypadku z rysunku 7. Stosunek w/c tego nowego układu jest równy 0,27, ale jego stosunek woda/spoiwo wynosi około 0,15.

Jak pokazano na rysunku 9, pierwsze hydraty powstające na powierzchni ziaren cementu będą powstawać w małej odległości od tych ziaren zanim otoczą sąsiadujące ziarna dodatku mineralnego. Natomiast ziarno dodatku mineralnego będzie bardzo szybko pełnić aktywną rolę w przenoszeniu naprężeń w zaczynie, niezależnie od jego stopnia przereagowania z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ powstałym z hydrolizy C_3S i C_2S .

Stosowanie betonów wykonanych z dużym dodatkiem popiołu lotnego było promowane przez Malhotra i Mehta (2008) pod nazwą „betony o dużej zawartości popiołu lotnego”. Ten rodzaj betonu był stosowany z powodzeniem w wielu projektach w Kalifornii.

We wczesnych stadiach reakcji cementu z wodą, pierwsze ulegają hydratacji małe cząstki cementu oraz bogatsze w C_3A i C_3S . Początkowo mniej reaktywne ziarna dodatku mineralnego zachowują się jak niereaktywne ziarna, które nie tworzą faz odpowiedzialnych za wczesną wytrzymałość zaczynu. Dlatego też w trakcie wczesnych etapów hydratacji cementu wieloskładnikowego duże znaczenie ma wzięcie pod uwagę stosunku w/c zaczynu cementowego, niezależnie od stosunku woda/spoiwo. Stosunek **w/c** stanowi pośrednią miarę odległości między ziarnami



Rys. 8. Stosunki w/s i w/c zaczynu cementowego, w którym 50% cementu portlandzkiego zostało zastąpione przez dodatek mineralny [cementitious material – dodatek mineralny] (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 8. Visual representation of the w/b and w/c of a cement paste in which 50% of Portland cement has been replaced by a supplementary cementitious material. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

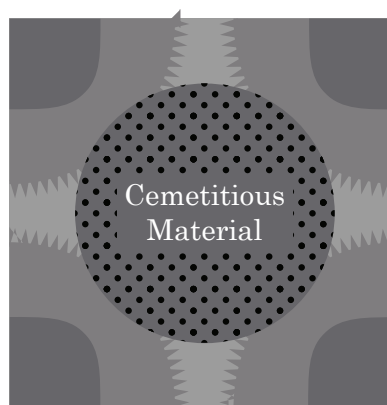
Going back to our 2D model, Figure 7 represents a unit-cell of a blended cement containing 25% of supplementary cementitious material. The water/binder ratio of this unit cell is about 0.60 (depending on the specific gravity of the supplementary cementitious material) like in our previous cement-only system of Figure 2. However, the water/cement ratio has increased to 0.79, as Portland cement has been diluted and the average distance between cement particles has increased.

In order to compensate for the negative effects of this dilution on the early compressive strength, cement chemists often modify clinker composition of their blended cements to match the initial compressive strength of a “pure” Portland cement.

When designing concrete with a blended cement, the authors believe that it is a much better approach to increase the initial strengths by decreasing the w/b ratio (making more sustainable and more durable concrete) than to modify the phase composition of the clinker.

To support this statement, let us go back to our simple 2D model and consider this time a more compact cement paste in which a supplementary cementitious particle has been placed in the middle of 4 cement particles, as shown in Figure 8. In this case, the unit-cell contains as much supplementary cementitious material particles as cement particles so the substitution rate of Portland cement is 50%, which is 2 times greater than in our previous case of Figure 7. The water/cement ratio of this new system is 0.27 but its water/binder ratio is about 0.15.

As illustrated in Figure 9, when the first hydrates that are developed at the surface of the cement particles they will have to grow a very short distance before encapsulating the adjacent supplementary cementitious particles. Very rapidly this supplementary cementitious particle will play an active role in the transmission of stresses in the paste, independently of its reaction rate with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ developed during C_3S and C_2S hydration.



Rys. 9. Otaczanie ziarna dodatku mineralnego przez hydraty sąsiadujących z nim ziaren cementu portlandzkiego [cementitious material – dodatek mineralny] (Kopia za zgodą Taylor i Francis)

Fig. 9. Encapsulation of a particle of supplementary cementitious material with the hydration of neighbouring Portland cement particles. (Reproduced with the permission of Taylor and Francis)

cementu, która wpływa na początkową reologię i wytrzymałość zaczynu, natomiast stosunek **woda/spoiwo** pośrednio wskazuje na rozmiar kapilar, które będą powstawać w zaczynie, w okresie jego wczesnej hydratacji. Średnica tych kapilar będzie wpływać na autogeniczny skurcz zaczynu, który będzie następował w wyniku jego kontrakcji.

W takim betonie bogatym w dodatki mineralne i o dużym dodatku superplastyfikatora lepiej jest zastosować napowietrzenie wynoszące kilka procent i pewien dodatek modyfikatora lepkości w celu skompensowania małej „zwilżalności” jego drobnych ziaren co spowoduje wzrost urabialności betonu.

5. Przykłady zastosowania betonów o nowej technologii

- Budowa zbiorników na ciekły gaz z betonu samozagęszczającego się o wytrzymałości 60 MPa w Osace, w Japonii (1990).
- Budowa Burj Khalifa w Dubaju (2010) z betonów BWW pompowanych na wysokość 600 m.
- Projekt Worli w Bombaju, w Indiach (2013) z betonów pompowanych z pierwszego do osiemdziesiątego trzeciego piętra.

6. Jak wprowadzić te zmiany technologiczne?

Konieczne jest szkolenie w wyższych uczelniach młodych inżynierów specjalizujących się w technologii betonu, którzy nauczą się jak uwzględniać wszystkie czynniki wpływające na właściwości nowoczesnych betonów, w celu opanowania, dzień po dniu, produkcji betonów wysokowartościowych, które będzie można pompować „aż do nieba” (Aïtcin i Wilson, 2014).

Koniecznym warunkiem będzie również, dostarczanie przez przemysł cementowy dla przemysłu betonów, cementów, które ułatwią produkcję tych nowoczesnych betonów, poprzez wytwarzanie dwóch rodzajów klinkieru:

- klinkier i cement do produkcji betonów o w/c większym od 0,50, który będzie zawierał mniej niż 8% C_3A (z uwagi na trwałość) i o rozdrobieniu pomiędzy 400 a 450 m^2/kg , co będzie sprzyjać rozwojowi wytrzymałości wczesnej;
- klinkier i cement do produkcji betonów o w/c mniejszym od 0,40, który będzie zawierał nie więcej niż 6,5% C_3A (ze względu na reologię mieszanki) i który ułatwi wykonanie i ułożenie tych betonów o małym w/c. Powierzchnia właściwa tych cementów powinna zawierać się pomiędzy 350 a 400 m^2/kg , ponieważ w tych betonach, to nie rozdrobienie cementu jest odpowiedzialne za jego wytrzymałość, ale raczej bliskie ułożenie ziaren cementu w hydratyzującym zaczynie.

Są to dwa główne wyzwania, z którymi wyższe uczelnie, przemysł cementowy i betonowy, projektanci i wykonawcy z Polski będą musieli się zmierzyć w najbliższych latach.

The use of concrete made with a high dosages of fly ash has been promoted by Malhotra and Mehta (2008) under the generic term of high volume fly ash concretes. This type of concrete has been used successfully in various projects in California.

At the early stages of hydration, the most reactive cement particles are hydrating first, that is the finer ones and the ones richer in C_3A and C_3S . The less reactive supplementary cementitious particles first act essentially as quasi non-reactive particles that do not create bonds responsible for the early strength of the paste. Therefore, during the early stages of hydration of blended cement it is very important to consider the value of the water/cement ratio of the cement paste separately from its water/binder ratio. The **water/cement** ratio provides an indirect measure of the closeness of the cement particles which influences the initial rheology and strength of the cement paste, while the **water/binder** ratio provides an indirect measure of the size of the capillaries that will be developed within the paste during its early hydration. The diameter of these capillaries will influence the autogenous shrinkage of the paste that will be developed due to its chemical contraction.

In such concrete containing a high amount of supplementary cementitious materials and a high dosage of superplasticiser, it is better to use a few percent of entrained air and some viscosity modifier to compensate for the low “wettability” of its fine particles and make the concrete more workable.

5. Some examples of the use of high-tech concretes

- Construction of liquid gas storage tanks in Osaka, Japan (1990) with a self-consolidating concrete of 60 MPa.
- Construction of Burj Khalifa in Dubai (2010) with HPCs pumped up to 600 m.
- Worli project in Mumbai, India (2013) with concretes pumped from the first floor to the 83rd floor.

6. How to implement these technological changes

It is necessary to train in Universities young engineers specialized in the domain of concrete, young engineers that will learn how to master all the parameters influencing the characteristics of modern concretes to be able to provide, day after day, high performance concretes that will be pumped up to the sky (Aïtcin and Wilson, 2014).

It will be also necessary that the cement industry provides to the concrete industry cements that facilitate the production of these new concretes by making two types of clinkers:

- a clinker for concretes having a w/c greater than 0.50 that will contain a maximum of 8% of C_3A (for durability reasons) and

Literatura / References

1. P.-C. Aïtcin, *High Performance Concrete*, E & FN SPON, p. 591, London, New York 1998.
2. P.-C. Aïtcin, Cemens of Yesterday and Today - Concrete of Tomorrow, *Cem. Concr. Res.*, **30**, 1349 (2000).
3. P.-C. Aïtcin, *Binders for Durable and Sustainable Concrete*, Taylor and Francis, p. 500, London, U.K. 2008.
4. P.-C. Aïtcin, S. Mindess, *Sustainability of Concrete*, Spon Press, p. 301, Abingdon, Oxon; New York 2011.
5. P.-C. Aïtcin, W. Wilson, The Sky's the Limit, *RILEM International workshop on performance-based specifications and control of concrete durability - Keynote presentation*, p. 4, Zagreb, Croatia, 11-13 June, 2014.
6. J. Albinger, J. Moreno, High Strength Concrete Chicago Style, *Concrete Construction*, **29**, 3, 241-245 (1991).
7. Anon, Water Tower Place - High Strength Concrete. *Concrete Construction*, **21**, 3, 100-104 (1976).
8. H. H. Bache, Densified Cement Ultra-fine Particle-Based Materials, *Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, Canada, 10-12 June, 1981.
9. D. Bentz, P.-C. Aïtcin, The Hidden Meaning of the Water-to Cement Ratio, *Concrete International*, **30**, 5, 51-54 (2008).
10. G. Clark, Challenges for Concrete in Tall Buildings, *Structural Concrete*, Accepted and Published Online 2014.
11. R. Féret, Sur la compacité des mortiers hydrauliques, *Annales des Ponts et Chaussées*, IV, pp. 5-161 (1892).
12. J.-L. Granju, J.-C. Maso, , Hardened Portland cement pastes, modelisation of the micro-structure and evolution laws of mechanical properties I- Basic results, *Cem. Concr. Res.*, **14**, 2, 249-256 (1984).
13. K. Khayat, D. Feys, *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, RILEM, Book Series, Vol.1, p. 458, Springer 2010.
14. V. M. Malhotra, P. K. Mehta, *High-Performance Fly Ash Concrete*, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., p. 142, Ottawa, Canada 2008.
15. H. Okamura, K. Oszawa, *Mix Design for Self-Compacting Concrete*, Concrete Library of JSCE, pp. 107-120 (1995).
16. P. Richard, M. Cheyrezy, Reactive Powder Concrete with high ductility and 200 - 800 MPa compressive strength, *ACI Special Publication 144*, pp. 507-508 (1994).
17. N. Soliman, A. Tagnit-Hamou, P.-C. Aïtcin, A new generation of Ultra-High Performance Glass Concrete, *Third All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete*, pp. 218-227, Moscow, May 12-16, 2014.

a fineness between 400 to 450 m²/kg to favour the development of early strength;

- a clinker for concretes having a w/c lower than 0.40 that will contain a maximum amount of C₃A of 6.5% (for rheological reasons) that will facilitate the fabrication and placing of these low w/c concretes. The specific surface area of such cements will have to be between 350 to 400 m²/kg because in these concretes, it is not the fineness of the cement that is responsible for its strength but rather the closeness of the cement particles in the hydrating paste.

These are the two major challenges that the Universities, the cement and concrete industry, the designers, and the contractors of Poland will have to face in the next years.