

Prof. François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, Francja

Naukowa metoda ustalania składu mieszanki betonowej

A scientific method for concrete mixture-proportioning

1. Wstęp

W ostatnich latach problem projektowania składu mieszanki betonowej stawał się z kilku co najmniej powodów coraz bardziej skomplikowany. Po pierwsze, pojawiły się takie składniki jak: domieszki organiczne, dodatki mineralne (popioły lotne, wypełniacze itp.) oraz włókna. Po drugie, kładziono nacisk na coraz większą ilość analizowanych właściwości betonu, zajmując się równocześnie całym jego cyklem życia (od reologicznego zachowania się mieszanki po trwałość betonu w stanie stwardniałym rozpatrywaną przy różnych środowiskach eksploatacji). Po trzecie wreszcie, zakres możliwych do uzyskania właściwości szalenie się poszerzył. Jeżeli ograniczymy się do najczęściej rozpatrywanych aspektów projektowania mieszanki betonowej, to pod względem konsystencji, dysponujemy dzisiaj mieszankami o konsystencji od wilgotnej do ultrapłynnej (samozagęszczalne). Z punktu widzenia wytrzymałości, można się dzisiaj zetknąć z betonami o wytrzymałości na ściskanie od 1-2 MPa (wtórnie stosowane materiały o kontrolowanej, niskiej wytrzymałości) do 200 MPa (zaprawy ultrawysokiej wytrzymałości, stosowane na przykład do wykonywania zbiorników do przechowywania materiałów radioaktywnych). Podsumowując, można powiedzieć, że problem projektowania mieszanki betonowej obejmuje – mówiąc językiem matematyka – znacznie więcej zmiennych i znacznie więcej wymiarów, w obszerniejszej przestrzeni, niż miało to miejsce dotychczas.

1. Introduction

In the recent years, the concrete mixture-proportioning problem has become more and more complicated. First, new components appeared, like organic admixtures, supplementary cementitious materials (as fly ash, filler etc.) and fibres. Second, emphasis was put on a growing number of concrete properties, dealing with the whole life cycle (from fresh state rheological behavior to durability in various environments). Third, the range of attainable properties displayed a dramatic increase. Restricting ourselves to the aspects most commonly considered in mix-design, dry to ultra-fluid (self-compacting) mixtures are available nowadays. Likewise, compressive strength from 1–2 MPa (for re-excavable controlled low-strength materials) to 200 MPa (for ultra-high strength mortars used e.g. in containers devoted to radioactive waste materials) can be envisaged. To summarize, the mix-design problem involves more variables and more dimensions in a larger space than before (mathematically speaking).

Appearance of high-performance concrete (HPC) is another recent phenomenon. In Europe, HPC is considered to be a concrete having a high strength at 28 days (typically more than 60 MPa in compressive strength) or a low water-binder ratio (less than 0.40). In USA, HPC is supposed to be a special mixture, matching specific requirements that cannot be achieved on a routine basis. Finally, what is needed everywhere is 'à la carte' concrete, that is, a

Pojawienie się betonów wysokowartościowych (HPC) jest kolejnym nowym zjawiskiem. W Europie, jako betony HPC uznaje się betony o wysokiej 28 dniowej wytrzymałości na ściskanie (zazwyczaj powyżej 60 MPa) lub o niskim stosunku wodno-cementowym (poniżej 0,40). W USA przyjmuje się, że betony grupy HPC to betony wykonane ze specjalnej mieszanki, która spełnia specyficzne wymagania, niemożliwe do spełnienia w oparciu o rutynowe działania. To czego najczęściej dzisiaj potrzebujemy to beton „la carte”, czyli beton który spełnia szeroką gamę wymagań, wykonany przy wykorzystaniu lokalnych materiałów i przy minimalnym koszcie. Ten właśnie problem jest rozpatrywany w niniejszym opracowaniu.

Wobec opisanej rzeczywistości, która nie odzwierciedla nic innego, tylko normalny postęp w technologii betonu, projektant jest poddany coraz większym ograniczeniom czasowym i kosztowym. Nierzadko mamy na przykład do czynienia z koniecznością weryfikacji właściwości zaprojektowanego betonu na krótko przed rozpoczęciem budowy (w wieku krótszym niż 28 dni), co oznacza, że rzeczywista wytrzymałość betonu jest nieznaną w momencie jego układania w deskowaniu. Ponadto, rynek betonu w Europie jest bardzo konkurencyjny. Okazuje się, że przedsiębiorstwa mają ograniczony budżet, który mogą poświęcić na projektowanie mieszanki betonowej, chociaż na tym fundamentalnym etapie rodzą się różne konsekwencje rzutujące na proces realizacji budowy i powstającą konstrukcję.

W oparciu o te przemyślenia, nasze laboratorium (LCPC) zdecydowało się na opracowanie programu komputerowego do projektowania mieszanki betonowej. Pierwszy produkt, nazwany Bétonlab (1, 2), zaproponowany w roku 1992, został stworzony dla celów szkoleniowych. Użytkownikowi przekazano rodzaj „elektronicznego laboratorium”, które pozwala na „wykonywanie betonu przy biurku”. Położono w nim nacisk na łatwość jego użytkowania. Po wprowadzeniu charakterystyk i ilości poszczególnych składników do odpowiednich „okienek”, można było symulować wykonywanie próbnich zarobów laboratoryjnych. Korzyść polegała na natychmiastowym uzyskaniu wyników badań, zaś wada na ograniczonej dokładności symulacji. Celem tej wersji programu było spowodowanie, aby użytkownik zrozumiał zachowania się systemu oraz mógł sprawnie reagować w rzeczywistej sytuacji. Program ten został szeroko rozpowszechniony we Francji (ponad 300 kopii) i pozostaje użytecznym narzędziem, szczególnie dla szkolenia studentów i inżynierów.

Poza Francją zaproponowano również inne programy projektowania mieszanki betonowej. Szeroki przegląd tych prac został ostatnio opublikowany przez polskich naukowców (3). Niektóre z tych programów polegają na programowaniu konwencjonalnych metod projektowania mieszanki betonowej, takich jak metoda ACI lub francuska metoda Dreux. Inne programy zajmują się oryginalnym podejściem, na przykład metoda Daya (przeznaczona bardziej do kontroli jakości, niż do wstępnego projektowania mieszanki) lub metoda Dewara, oparta na modelu trójskładnikowego upakowania. Wśród tych metod niewiele jednak opiera się na solidnym, wyraźnym naukowym podejściu.

Uwzględniając najnowszy postęp w technologii informatycznej praktyczne wykorzystanie modeli numerycznych nie następuje większych trudności. Zebranie istniejących modeli i ich wspólne wykorzystanie jest możliwe i łatwe przy zastosowaniu wspólnego pakietu arkusza kalkulacyjnego. Trudność i wyzwanie stanowi natomiast tworzenie samych modeli, które muszą wyrażać związek pomiędzy składem mieszanki i właściwościami technicznymi betonu stwardniałego na tyle dokładnie, na ile jest to tylko możliwe. Dlatego właśnie w LCPC badania takie wykonuje się już od wielu lat. W ramach tych badań wykonano szereg prac doktor-

mixture that matches a comprehensive list of requirements, by using local materials at minimum cost. This is the problem investigated in the present paper.

Facing this reality, which is no more than the normal progress of concrete technology, the formulator is submitted to growing time and cost constraints. For instance, it is not seldom seeing a concrete study starting less than 28 days before the beginning of a construction site, which means that the actual compressive strength is unknown while the first concrete is cast into the structure. Moreover, the concrete market is very competitive in Europe. It turns out that concrete companies have only restricted budgets to spend in mix-design, although from this fundamental stage comes a great deal of consequences for the site operations and for the structure to be built.

Based upon these considerations, LCPC decided to develop concrete mixture-proportioning software. A first product, entitled Bétonlab (1, 2) and proposed in 1992, was created for tutorial purposes. A sort of 'electronic laboratory' was given to the user, in order to allow him to 'cast concrete on his desk'. Emphasis was put on the ease of utilization. After having filled up a small number of boxes dealing with the constituents, one could simulate the production of laboratory trial batches. The advantage was to immediately obtain the test results, with the drawback of limited precision of the simulations. But the aim was to provide the user with an understanding of the system behavior, so that he could efficiently react in a real situation. This product has been widely distributed in France (about 300 copies), and remains a suitable tool, especially for training students or professionals.

Out of France, other mix-design software programs were proposed. A comprehensive review of this matter was recently published by Polish researchers (3). Some products are essentially a programming of conventional mix-design methods like the ACI method or the French Dreux' method. Other programs deal with an original approach, as Day's one (more devoted to quality control than to initial mixture-proportioning), or Dewar's method, based upon a ternary packing model. However, among these methods few of them are based on a sound and explicit scientific approach.

Given the recent advances in computer technology, the practical use of numerical models is no longer difficult. Assembling models to use them together can be readily performed with a common spreadsheet package. What remains difficult and challenging is the construction of the models themselves, which must express the relationship between mix-composition and engineering properties as precisely as possible. This is why LCPC started such a research effort some years ago. A number of doctoral theses were prepared with complementary objectives. Together with other works, they are summarized in a book (4). An overview of this scientific basis is given in the present paper, together with a selection of most significant figures. Then a practical example is presented, dealing with the design of a special high-performance concrete for pavement application.

2. Overall approach

In most of the models developed, emphasis is put on the granular structure of concrete. First, the packing density and segregation ability of dry packing of particles are studied. Second, attention is focused on the properties of fresh concrete. Third, the hardened concrete mechanical properties are dealt with, using a model of aggregate particles surrounded by a cement-based matrix.

skich mających różne, uzupełniające się cele. Wyniki tych prac zostały podsumowane i łącznie z wynikami innych prac, przedstawione w książce (4). Niniejsze opracowanie dokonuje przeglądu przedstawionych tam podstaw naukowych i zawiera wybór najbardziej istotnych rysunków. W zakończeniu przedstawiony został przykład praktyczny, dotyczący projektowania betonu wysokowartościowego przeznaczonego do wykonania nawierzchni drogowej.

2. Podejście ogólne

W większości opracowanych modeli kładzie się nacisk na ziarnistą strukturę betonu. Po pierwsze, przestudiowano gęstość upakowania i podatność na segregację sucho upakowanych ziaren. Po drugie, skoncentrowano uwagę na właściwościach mieszanki betonowej. Po trzecie wreszcie, zajęto się właściwościami mechanicznymi betonu stwardniałego, stosując model oparty na ziarnach kruszywa otoczonych matrycą ze spoiwa cementowego (zaczynu).

2.1. Model ścisłego upakowania (Compressive Packing Model – CMP)

Model ten stanowi trzecią generację opracowanych w LCPC modeli upakowania. Jego celem jest przewidywanie gęstości upakowania mieszanki polidispersyjnej, w oparciu o znajomość trzech rodzajów parametrów:

- i) gęstości upakowania klas o jednej wielkości (frakcji),
- ii) składu ziarnowego mieszanki,
- iii) energii zagęszczania.

Model ten jest oparty na koncepcji wirtualnej gęstości upakowania oraz wskaźnika zagęszczenia.

2.1.1. Wirtualna gęstość upakowania zbioru ziaren

Wiadomo, że dla danego zbioru ziaren gęstość upakowania, stanowiąca stosunek ich objętości do całej objętości pojemnika, w którym się one znajdują, zależy od sposobu ich rozmieszczenia. Wirtualna gęstość upakowania stanowi maksymalną wartość gęstości, możliwą do uzyskania przy rozmieszczeniu ziaren, jedno po drugim, bez zmiany ich kształtu. W mieszankach wykonywanych w warunkach przemysłowych ziarna są zawsze rozmieszczone w sposób przypadkowy i dlatego doświadczalna gęstość upakowania jest niższa niż wirtualna.

Rozważmy mieszankę składającą się z ziaren różnego kształtu, podzielonych na n klas (frakcji) o jednakowej wielkości (podział w zakresie konwencjonalnego procesu przesiewania). W każdej mieszance można wyróżnić *klasę dominującą*, to znaczy taką, która wypełnia pustki między ziarnami większymi (patrz rysunek 1). Niech i oznacza rezydualną gęstość upakowania, będącą gęstością upakowania wirtualnego, gdy klasa ta jest wyodrębniona i w pełni upakowana. Gęstość upakowania całej mieszanki jest obliczana przy założeniu, że nasypowa objętość klasy i wypełnia przestrzeń dookoła większych ziaren; ponadto, należy także dodać objętość drobniejszych klas wypełniających pustki klasy i . W obliczeniach muszą być wzięte pod uwagę równocześnie dwa efekty: efekt ściany, powodowany przez większe ziarna oraz efekt rozluźnienia powodowany przez ziarna mniejsze. W modelu tym zakłada się addytywność tych efektów.

2.1. Compressive Packing Model (CPM)

This model is the third generation of packing models developed at LCPC. The aim is to predict the packing density of a polydisperse mix, from the knowledge of three types of parameters:

- i) packing density of monosize classes;
- ii) size distribution of the mix; and
- iii) compaction energy.

It is based upon the concepts of virtual packing density and compaction index.

2.1.1. Virtual packing density of an assembly of particles

For a given population of grains, it is well known that the packing density, which is the ratio of the solid volume by the total volume of the container, depends on the placing process. The virtual packing density is, by convention, the maximum value which is attainable by placing the grains one by one, without altering their shape. Industrial mixtures are always randomly placed, with a finite energy, so that the experimental packing density is lower than the virtual one.

Let us consider a mix of particles of any shape, divided into n classes of monosize particles (with respect to conventional sieving process). In any mix, one may define the dominant class i , which forms itself a packing in the voids of the coarser particles (see Fig. 1). Let b_i be its residual packing density, that is the virtual packing density displayed when the class is isolated and fully packed. The packing density of the overall mixture is computed by noting that the bulk volume of the i class fills the space around the coarser grains; moreover, the volume of finer classes inserted in the voids of i class must be added. Two interaction effects must be accounted for in this calculation: the wall effect, exerted by the coarser grains, and the loosening effect exerted by the finer particles. In the model, it is assumed that those interactions are additive, which means that a possible intersection between the perturbed zones is neglected.

2.1.2. Actual packing density: the concept of compaction index

The previous idea, when applied to a n -class mixture of particles leads to the calculation of n equations of the virtual packing density, each one being valid when the corresponding class is dominant. The 'real' virtual packing density is the lowest of these n values. Another parameter, called the compaction index K , is necessary to compute the actual packing density. It expresses to which extent the actual packing is close to the virtual one. Therefore, K appears as a characteristic of the placing process. Mathematically, it is defined as the sum of partial compaction indexes K_i corresponding to each class i . K_i is governed by the actual volume of i grains in the mix Φ_i , and by Φ_i^* , the maximal value of Φ_i if the mix were fully packed by an excess of i grains, all the remaining classes having a constant volume. The equation is

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i}{\Phi_i^*} \quad [1]$$

When the solid concentration increases from zero up to the virtual packing density, the packing index grows from zero to infinity. For

2.1.2. Rzeczywista gęstość upakowania: koncepcja wskaźnika zagęszczenia

Idea ta, zastosowana do mieszanki ziaren, składającej się z n klas prowadzi do obliczenia n równań wirtualnej gęstości upakowania, przy czym każde z nich jest ważne, gdy odpowiadająca mu klasa jest dominująca. „Rzeczywista” wirtualna gęstość upakowania jest najniższą z tych n wartości. Dla obliczenia rzeczywistej gęstości upakowania konieczny jest jeszcze inny parametr zwany wskaźnikiem zagęszczenia K . Dlatego więc K pojawia się jako charakterystyka procesu rozmieszczenia ziaren. Matematycznie jest on zdefiniowany jako suma częściowych wskaźników zagęszczenia K_i , odpowiadających każdej z klas i . K_i wynika z rzeczywistej objętości ziaren klasy i w mieszance i oraz z i^* będącym maksymalną wartością i , gdyby mieszanka została w pełni upakowana przez nadmiar ziaren i ; przy wszystkich pozostałych klasach posiadających stałą objętość. Równanie opisujące wartość K wygląda następująco:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i}{\Phi_i^*} \quad [1]$$

Gdy koncentracja ziaren zwiększa się od zera do wirtualnej gęstości upakowania, wskaźnik upakowania K rośnie od zera do nieskończoności. Ustalenie wartości K dla danej mieszanki ziaren, prowadzi do równania mającego tylko jedno rozwiązanie w postaci rzeczywistej gęstości upakowania przewidzianej przez model.

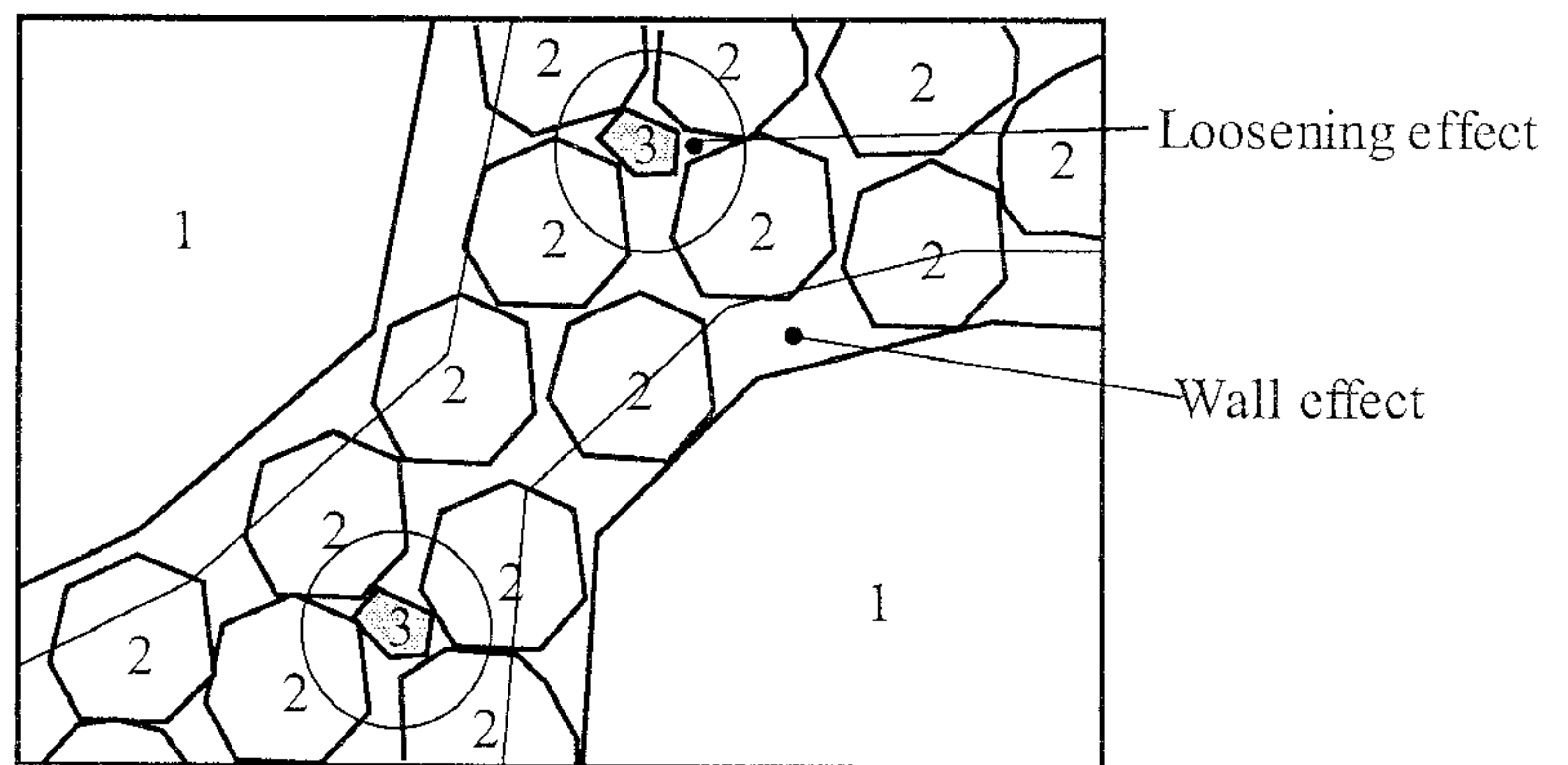
2.1.3. Dokładność modelu

Model ten, aby był użyteczny, wymaga ogólnej kalibracji w celu skwantyfikowania z jednej strony interakcji międzyziarnowych (efekt ściany i efekt rozluźnienia) oraz wskaźników zagęszczenia K odpowiadających różnym procesom zagęszczania, z drugiej. Kalibracja została przeprowadzona przy wykorzystaniu licznych danych albo oryginalnych, albo wziętych z literatury. Załóżmy, że model ma być używany dla przewidywania gęstości upakowania jakiejkolwiek kombinacji kilku elementarnych klas (frakcji). W tym celu muszą zostać pomierzone indywidualne gęstości upakowania tych klas (frakcji), z których można określić wartości i . Na tym etapie model pozwala na obliczenie gęstości upakowania mieszanek ze składu uziarnienia (kontrolowanego przez skład mieszanki) oraz wartości K . W ogólności, uzyskiwana dokładność jest lepsza, niż jeden procent absolutnej wartości gęstości upakowania.

Ze względu na dobrą zdolność przewidywania, model pozwala użytkownikowi na poszukiwanie kombinacji optymalnej gęstości upakowania. Wywołuje on jednak wątpliwości na temat koncepcji idealnej krzywej uziarnienia, która stanowi podstawę wielu metod projektowania składu mieszanki. I rzeczywiście, optymalny rozkład uziarnienia, w danym jego zakresie, zależy w dużym stopniu od kształtu cząstek. Może to być powodem, dla którego różni autorzy proponują różne krzywe. Przedstawiona metoda CPM przewiduje rozkłady zależne od różnych wartości β_i .

2.1.4. Zastosowanie modelu do oceny podatności na segregację: wykres wypełnienia

Ocena stabilności mieszanki ziaren, czyli jej odporności na segregację, jest dokonywana za pomocą nowego narzędzia nazwanego „wykresem wypełnienia” (patrz rys. 2). Po pierwsze, materiał ziarnisty jest dzielony na serie skupionych klas, z których każda charak-



Rys. 1. Upakowanie ziaren trzech frakcji przy dominującej frakcji średniej

Fig. 1. Ternary packing of particles, where the intermediate class is dominant.

a given mixture, fixing a K value provides an implicit equation that has only one solution: the actual packing density predicted by the model.

2.1.3. Accuracy of the model

To be usable, the model needs a general calibration, in order to quantify the granular interactions (wall effect and loosening effect) on one hand, and the compaction indexes (K values) corresponding to the various placing processes, on the other hand. This work was carried out with numerous data, either original or extracted from the literature. Now, let us assume that the model is to be used for predicting the packing density of any combination of some elementary classes. Then, the individual packing density of these classes must be measured, from which the β_i values are deduced. At this stage, the model is able to calculate the packing density of mixes, from the size distribution (controlled by the mix proportions) and the K value. Generally speaking, the accuracy is better than one percent in packing density absolute value.

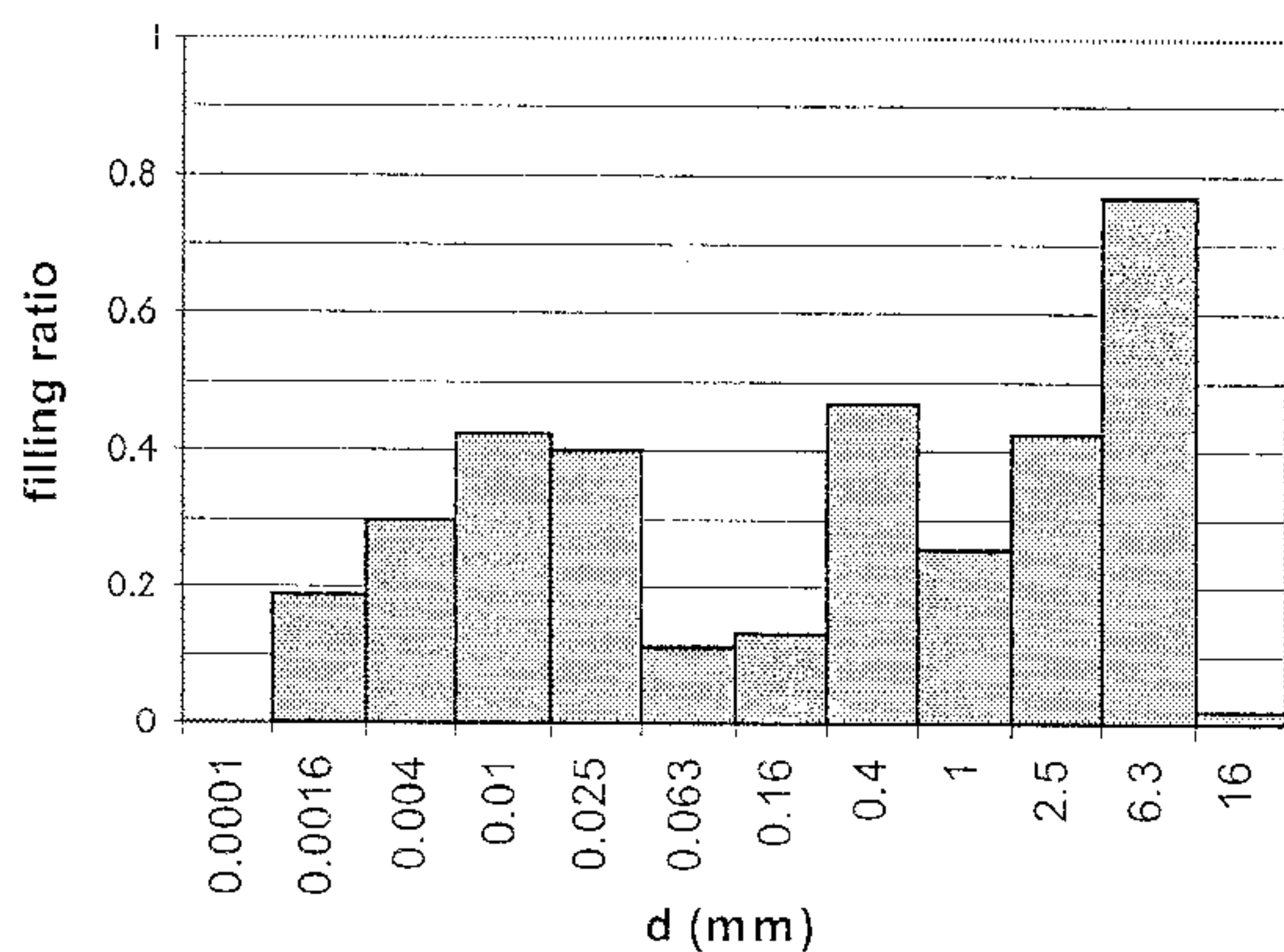
Owing to its good predictive capabilities, the model allows the user to search combinations of optimal packing density. It raises doubts about the concept of ideal grading curve, a popular idea in many mix-design methods: quite obviously, the optimal size distribution over a given grading span depends significantly on the shape of the particles. This could be the reason why many different curves are suggested by various authors. The CPM predicts distributions that depend on the various β_i values.

2.1.4. Application to segregation ability: the filling diagram

The assessment of the stability of a mixture, that is its resistance to segregation, is performed through a new tool entitled 'filling diagram' (see Fig. 2). First, the granular material is divided in a series of clustered classes, each one having a ratio of extreme sizes D_{max}/D_{min} equal to 2.5. Then, the filling ratio Φ_i/Φ_i^* relative to the i class is calculated. Φ_i stands for the volume of i grains in the compacted mixture, while Φ_i^* is the maximum value of Φ_i that could be introduced, all other granular volumes being constants. An ideal size distribution, from the stability viewpoint, would generate a uniform filling diagram.

It turns out that the search for a maximum packing density leads to higher extreme peaks, with regard to the other ones. This is because the finest class, or the coarsest one, has to replace the lacking finer, or coarser grains, respectively. A gap in the filling diagram indicates a discontinuity in size distribution, which is gen-

BHP4B



Rys. 2. Wykres wypełnienia mieszanki ziarnistej. Każda wysokość słupka odpowiada rozważanej frakcji, gdyby była ona w pełni upakowana i całkowicie rozsegregowana na dnie zbiornika

Fig. 2. Filling diagram of a granular mixture. Each peak corresponds to the height of the considered fraction, if it would be fully packed and totally segregated in the bottom of a container.

teryzuje się stosunkiem granicznych wielkości ziaren D_{max}/D_{min} równym 2,5. Następnie obliczany jest stosunek wypełnienia i/i^* , odnoszący się do klasy i i odpowiada objętości ziaren i w zagęszczonej mieszance, a i^* jest maksymalną wartością i , która mogłaby być wprowadzona przy zachowaniu stałości wszystkich innych objętości ziarnowych. Idealny rozkład uziarnienia, z punktu widzenia stabilności, będzie powodował, iż wykres wypełnienia będzie jednorodny (podobne wysokości słupków jak na rysunku 2).

Okazuje się, że poszukiwanie maksymalnej gęstości upakowania, prowadzi do wyższych, w porównaniu z innymi, wartości współczynnika wypełnienia. Wynika to z faktu, że klasa najdrobniejsza lub najgrubsza musi odpowiednio zastąpić brakujące drobniejsze lub grubsze ziarna. Luka w wykresie wypełnienia wskazuje na nieciągłość uziarnienia, które jest generalnie uważane za czynnik sprzyjający segregacji. Wykres wypełnienia pozwala wtedy użytkownikowi na postawienie diagnozy dotyczącej uziarnienia mieszanki i dostarcza wskazówki w przypadku nadmiernej segregacji.

2.2. Właściwości mieszanki betonowej

2.2.1. W jaki sposób opisać naukowo płynięcie i układanie mieszanki betonowej

W czasie od wykonania mieszanki betonowej do jej ułożenia może ona podlegać dwóm rodzajom odkształceń. Może być ona ścinana i/lub zagęszczana. Dla mieszanek wilgotnych najważniejszą sprawą jest zagęszczanie. Dla mieszanek bardzo ciekłych, takich jak samozagęszczalne, istotne jest przede wszystkim odkształcenie przy ścinaniu, gdyż zagęszczenie zapewnia sama grawitacja.

Zagęszczalność jest bezpośrednio opisana przez wskaźnik zagęszczenia, który oznaczmy przez K' , w odróżnieniu do K , odpowiadającego mieszance suchych składników. Wartość K' stanowi najważniejszy parametr w projektowaniu mieszanki. Niestety, przynajmniej według autora, nie ma obecnie sposobu jego pomiaru. Jeżeli chodzi o zachowanie się przy ścinaniu to wiadomo, że w całym zakresie konsystencji, od ciekłej do wilgotnej, mieszanka betonowa może być postrzegana jako materiał, który można opisać modelem Bingham'a. Innymi słowy, jej reologiczne zachowanie opisujące zależność naprężenie ścinające – gradient odkształce-

erally considered as a factor for segregability. Then, the filling diagram allows the user to make a diagnosis of a granular mixture, and provides guidance in case of excessive segregation.

2.2. Fresh concrete properties

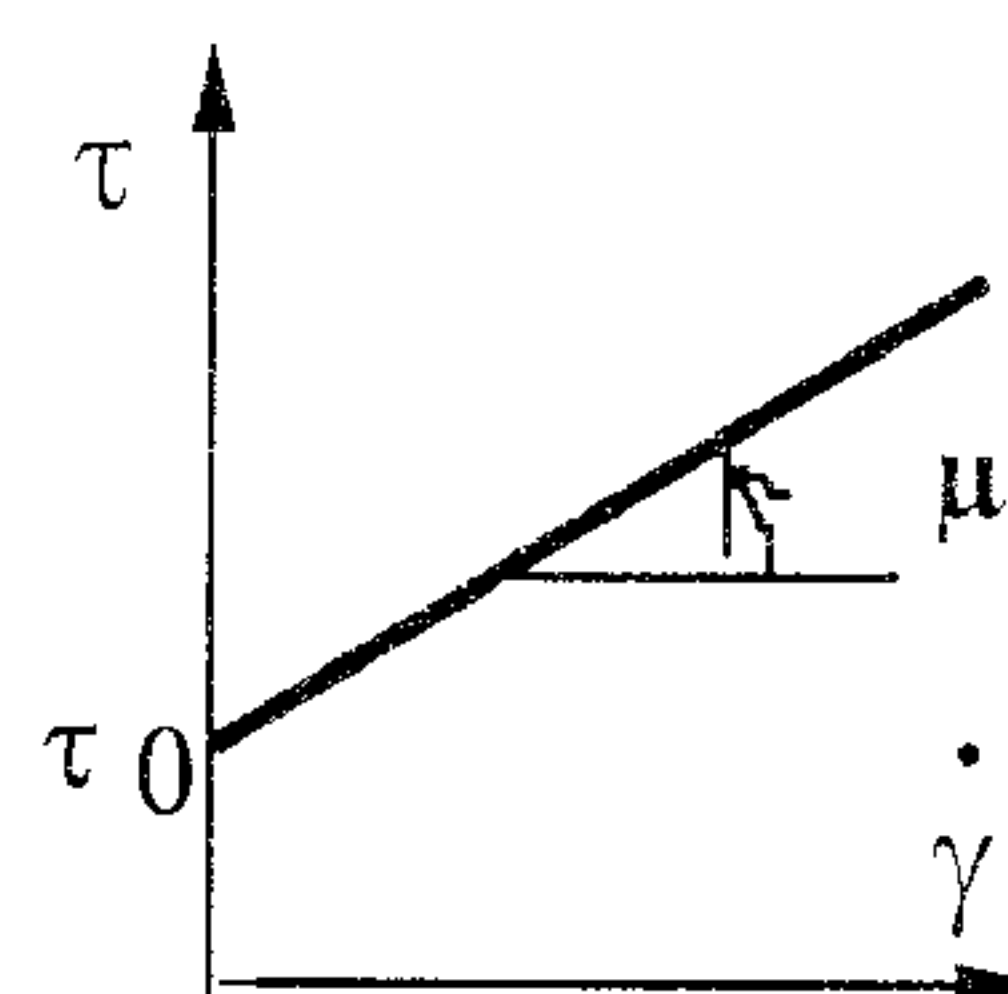
2.2.1. How to describe scientifically the flow and placement of fresh concrete

Between the mixer and the form, fresh concrete may undergo two types of elementary deformations: it may be sheared and/or compacted. For very dry, bulking concretes, compaction is the critical step. On the contrary, for very fluid mixtures like self-compacting concretes, the important phenomenon is the shear deformation (since gravity alone ensures the mixture compaction).

Compactability is directly described by the compaction index, that we will call K' in the case of fresh concrete, to make a distinction with that of the corresponding dry mixture. K' is a major mix-design parameter. Unfortunately, there is today no way to measure it, to the best of the author's knowledge. As for the shear behavior, it is well known that, in the range of soft-to-dry consistency, fresh concrete may be viewed as a Bingham material; in other words, its rheological behavior is described by a straight line in a diagram giving the shear stress vs. strain gradient (see Fig. 3). The intercept of the line is the yield stress, and the slope is called plastic viscosity. Within these two parameters, the former is closely related to the slump. The latter makes the difference between a 'worker-friendly' high-performance concrete from those having a 'sticky' behavior, being hard to pump and displaying coarse bubbling at the form removal.

2.2.2. Prediction of plastic viscosity, yield stress and slump

The yield stress is a common feature of fresh concrete and dry granular materials (like soils), while plastic viscosity tends to relate fresh concrete to Newtonian bodies like oils or water. Therefore, one may assume that the yield stress is the result of intergranular friction during concrete shear, while plastic viscosity is the macroscopic signature of the flow of water in the porosity of the granular system. As for the viscosity of Newtonian bodies, plastic viscosity is governed by the relative concentration of the mixture (see Fig. 4), defined as the ratio between the proportion of solid materials (in volume) and its packing density. This last parameter can be viewed as the maximum solid proportion corresponding to a non-workable, water-saturated fresh concrete. From this assumption, it can be concluded that the contribution of the various grain fractions contribute to the plastic viscosity only to the extent to which they contribute to the packing density of the corresponding dry mixture.



Rys. 3. Binghamowski model mieszanki betonowej

Fig. 3. The Bingham model for fresh concrete

nia (rysunek 3) jest liniowe. Przecięcie się linii z osią naprężeń wskazuje na granicę plastyczności (płynięcia), a jej nachylenie odpowiada lepkości plastycznej. Spośród tych dwóch parametrów pierwszy jest blisko związany z opadem stożka. Drugi zaś, stanowi o różnicy między „przyjazną dla betoniarza” mieszanką betonu wysokiej wytrzymałości i mieszankami o dużej lepkości, trudnymi do pompowania i sprzyjającymi powstawaniu pęcherzy i raków w betonowanych elementach.

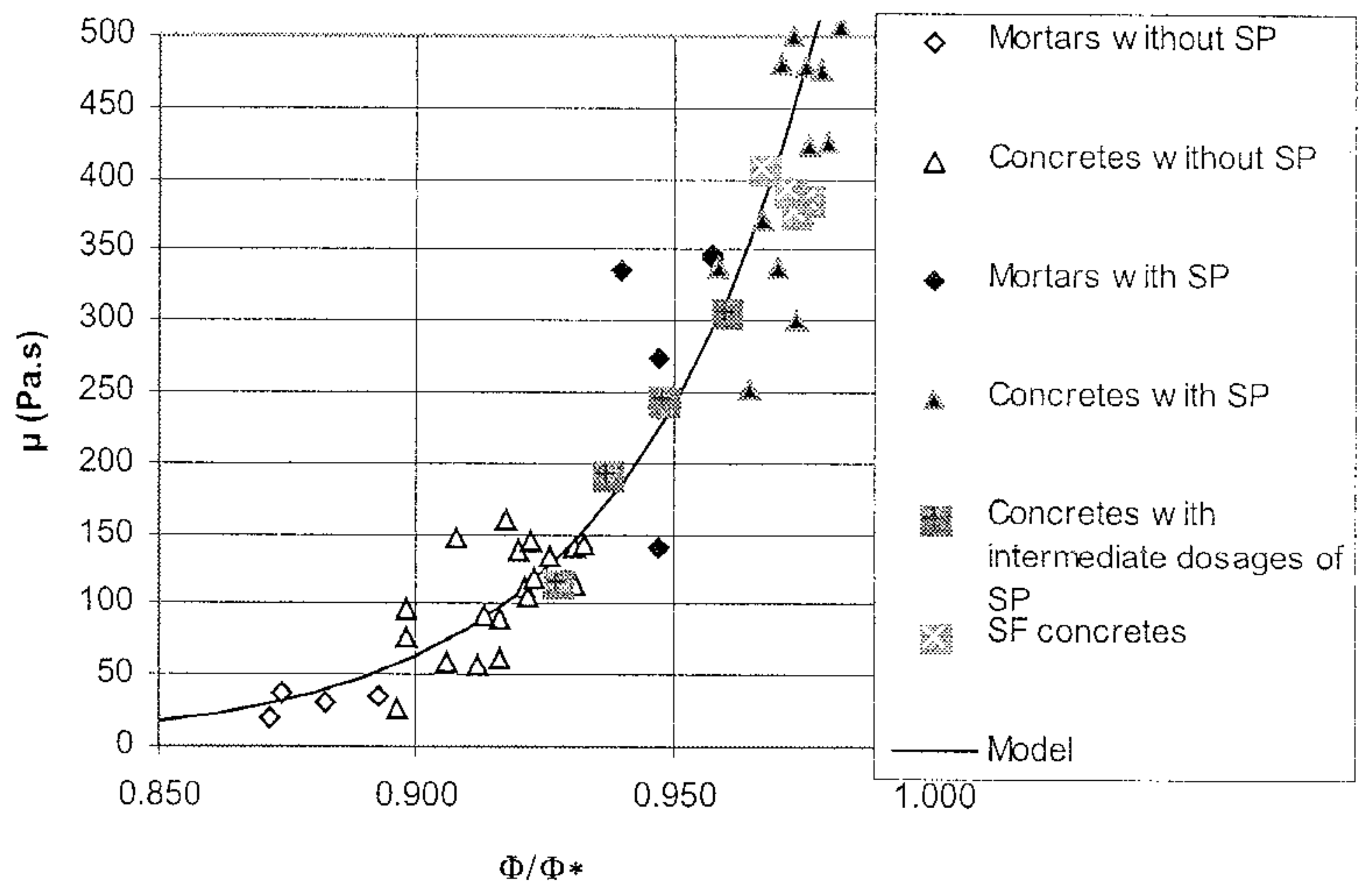
2.2.2. Przewidywanie lepkości plastycznej, granicy płynięcia i opadu stożka

Granica płynięcia jest cechą wspólną dla mieszanki betonowej i suchych materiałów ziarnistych (takich na przykład jak grunty), podczas gdy lepkość plastyczna to cecha pozwalająca na porównanie mieszanki do cieczy newtonowskich, takich jak olej lub woda. Dlatego więc można przyjąć, że granica plastyczności jest efektem międzyziarnowego tarcia w trakcie ścinania mieszanki betonowej, podczas gdy lepkość plastyczna jest makroskopowym efektem przepływu wody w pustkach systemu ziarnistego. Lepkość plastyczna jest zależna od względnej koncentracji fazy stałej w mieszance (patrz rysunek 4), zdefiniowanej jako stosunek między objętością tej fazy i gęstością upakowania. Ten ostatni parametr można postrzegać jako maksymalny udział fazy stałej odpowiadający nieurabialnej, nasyconej wodą mieszanki betonowej. Z tego założenia można wywnioskować, że istnienie różnych frakcji ziaren przyczynia się do lepkości plastycznej tylko w takim zakresie, w jakim przyczyniają się one do gęstości upakowania w odpowiadającej im suchej mieszance.

Inny model rozpatrujemy przy rozważaniu granicy płynięcia. Stos małych ziaren zawiera więcej kontaktów międzyziarnowych, niż stos ziaren dużych. Stąd spowodowane tym tarcie, dla danego wskaźnika zagęszczenia, jest wyższe. Aby móc przewidywać granicę płynięcia mieszanki trzeba zsumować wkład tarcia różnych frakcji ziaren, które zależy od ich częściowego wskaźnika zagęszczenia z wagą w postaci odpowiedniego współczynnika. Ten współczynnik ("współczynnik tarcia") wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wielkości ziaren. Współczynnik tarcia cementu może ulec nawet pięciokrotnemu zmniejszeniu po dodaniu superplastyfikatora (smarne oddziaływanie domieszki). Superplastyfikator wywołuje także efekt deflokulacji, który może być mierzony zmniejszeniem się zapotrzebowania na wodę, dając wyższą wartość rezydualną gęstości upakowania w ramach omawianego modelu upakowania. I wreszcie, model granicy płynięcia może być przekształcony na model opadu stożka, przy średniej dokładności około 4 do 5 cm. Jak pokazano to na rysunku 5, wpływ różnych parametrów składu mieszanki (dla serii mieszanek z superplastyfikatorem wykonanych z takich samych składników) na opad stożka można przewidywać dosyć dokładnie.

2.2.3. Stabilność mieszanki betonowej

Aby zaprojektować skład mieszanki betonowej o zadowalających własnościach, nie wystarczy zająć się tylko jej zagęszczalnością i reologią. Trzeba również uwzględnić problem wydzielania mleczka cementowego (bleeding) oraz zjawisko segregacji składników. Podatność na segregację może być przewidywana na podstawie pokazanego wcześniej wykresu wypełnienia (rysunek 2), który powinien być na tyle jednorodny, na ile jest to tylko możliwe. W celu ograniczenia rozdzielania się żwiru od zaprawy, należy zwrócić uwagę na wartość współczynnika wypełnienia dla kruszywa gru-



Rys. 4. Zależność między lepkością plastyczną i względną koncentracją fazy stałej /*

(SP – superplastyfikator, SF – pył krzemionkowy)

Fig. 4. Relationship between plastic viscosity and relative solid concentration. SP = superplasticizer. SF = silica fume

The pattern is different if the yield stress is considered. As a matter of fact, a small particle assembly contains more interparticle contacts than a large particle packing. Thus, the friction generated is higher, for a given compaction index. In order to predict the yield stress of fresh concrete, one must add the contributions of the various grain fractions, which depend on their partial compaction index, weighed by a coefficient. This 'friction' coefficient increases when the particle size decreases. The cement friction coefficient may decrease in a 5 to 1 ratio when a superplasticizer is added: this is the lubricating effect of the admixture. Moreover, superplasticizer exerts also a deflocculating effect, which can be measured through the decrease of water-demand, giving a higher residual packing density in the frame of the packing model. Finally, the yield stress model may be converted into a slump model, having a mean precision of about 4-5 cm. The influence of the various mix-design parameters is predicted correctly, as can be seen in Fig. 5 for a series of superplasticized mixtures made up with the same components.

2.2.3. Fresh concrete stability

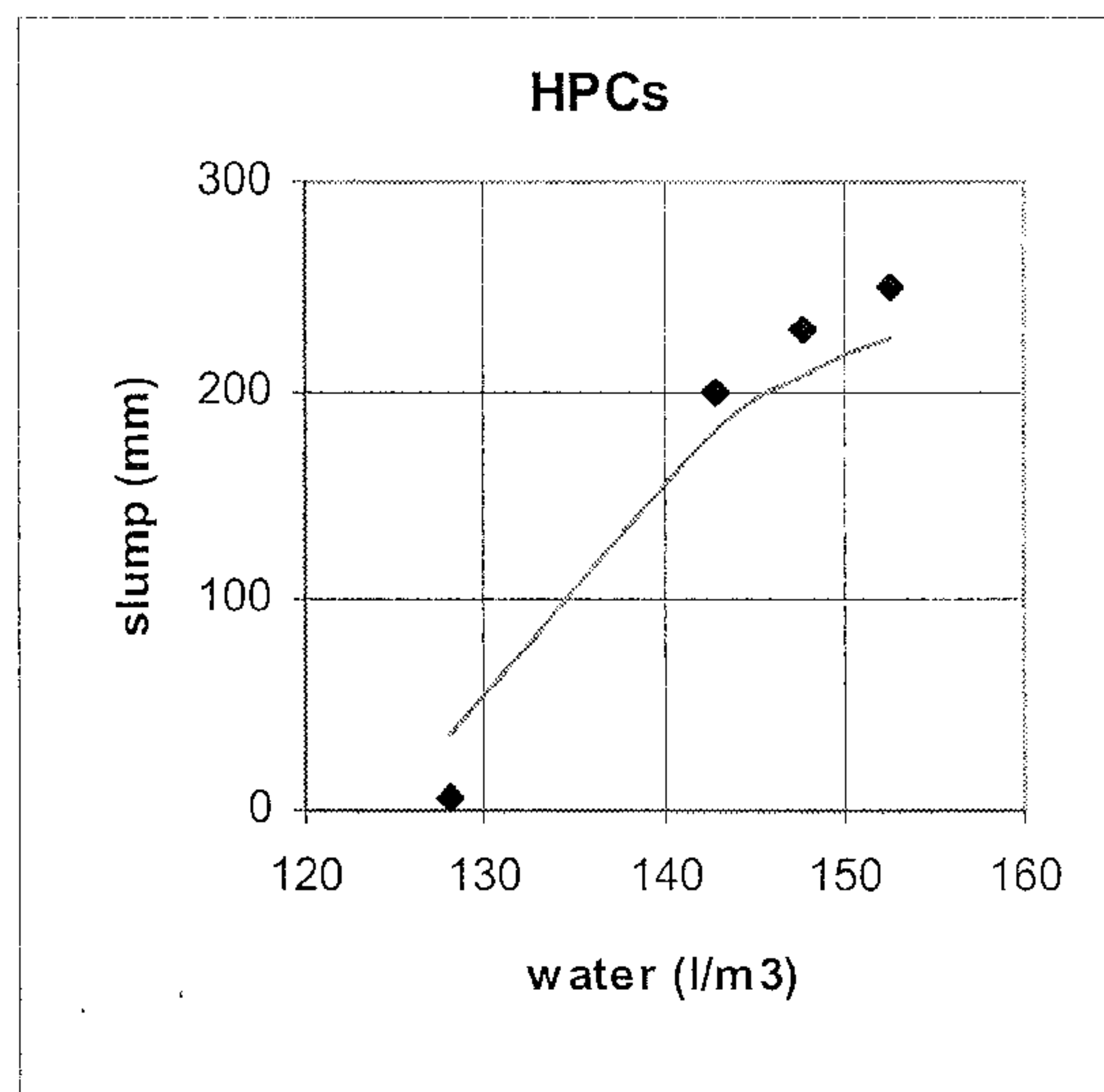
To design a concrete having satisfactory fresh properties, it is not sufficient to deal with compactability and rheology. Bleeding and segregation have also to be controlled. Segregation can be predicted through the filling diagram, which must be as uniform as possible. For limiting a gravel/mortar separation, attention must be drawn on the coarse aggregate peak, which should be not too high; moreover, a gap in the sand should be avoided. As for bleeding, it seems to correlate with the height of the peaks in the fine region: the higher the peaks, the less bleeding appears. In presence of superplasticizer, these peaks have to be even higher (more fine particles being necessary to limit the bleeding phenomenon).

2.3. Hardened concrete properties

2.3.1. Heat of hydration

Cement hydration and pozzolanic reactions produce heat, which may provoke important temperature rises in massive structures.

bego, która nie powinna być zbyt wysoka. Ponadto należy unikać nieciągłości uziarnienia piasku. Jeżeli chodzi o zjawisko wydzielania mleczka cementowego, wydaje się, że koreluje ono z wielkością współczynnika wypełnienia w zakresie drobnego kruszywa: im wyższe wartości współczynnika wypełnienia, tym mniej mleczka cementowego pojawia się na powierzchni. W obecności superplastyfikatora, wartości współczynnika wypełnienia muszą być nawet wyższe, potrzeba bowiem więcej drobnych cząstek dla ograniczenia zjawiska wydzielania mleczka cementowego.



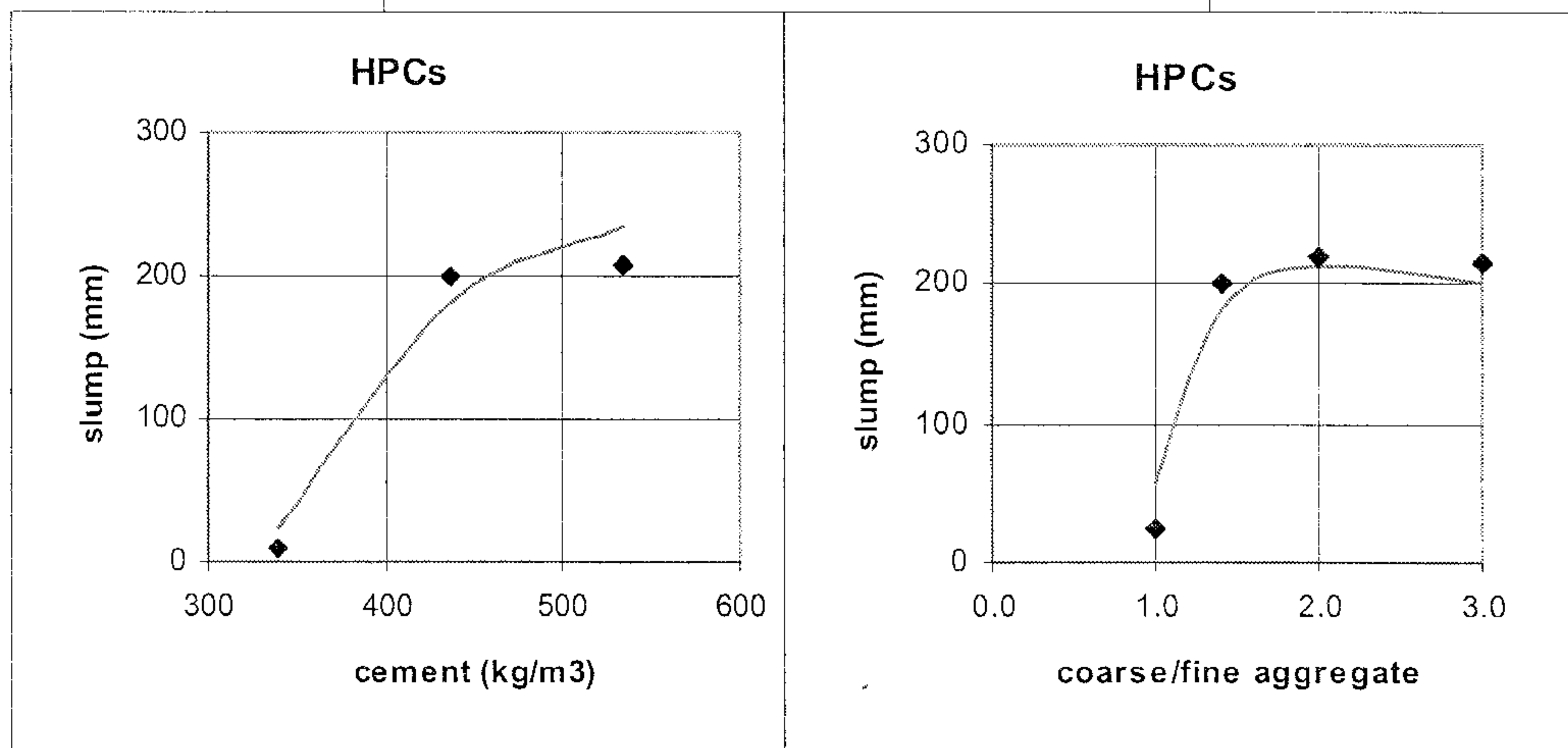
2.3. Własności betonu stwardniałego

2.3.1. Ciepło hydratacji

Hydratacja cementu i reakcje pucolanowe powodują wydzielanie ciepła, które może spowodować istotny wzrost temperatury masywnego betonu. Podwyższona temperatura może spowodować pęknięcia podczas chłodzenia lub może ułatwić opóźnione tworzenie się ettringitu. Dlatego istotną jest możliwość kontrolowania ilości ciepła powstającego w danym betonie, już na etapie projektowania składu mieszanki. W ramach przeprowadzonych badań oceniono pojemność cieplną, stopień hydratacji cementu (lub stopnia zaawansowania reakcji pucolanowej popiołów lotnych i pyłu krzemionkowego) oraz ciepło uwalniane przez jednostkę masy reagującego spoiwa. Na podstawie tych wstępnych modeli, opracowano model wzrostu temperatury betonu w warunkach adiabaticznych, charakteryzujący się średnią dokładnością około 2°C.

2.3.2. Wytrzymałość na ścislenie i rozciąganie

Parametrem najczęściej stosowanym do przewidywania wytrzymałości na ścislenie jest stosunek wodno-cementowy. W rzeczywistości parametr ten opisuje koncentrację cementu w zaczynie, odpowiedzialną za potęgową postać zależności „wytrzymałość – w/c” (jak w słynnym wzorze Féreta). W chwili gdy zaczyn wypełni pustki międzyziarnowe, jego właściwości są zmodyfikowane przez topologię ziaren kruszywa. Dokładniej, jest to średnia odległość pomiędzy dwoma sąsiadującymi ziarnami kruszywa grubego, nazywana „maksymalną grubością zaczynu” (Maximal Paste Thickness – MPT); im niższa jest wartość MPT, tym wyższa jest wytrzymałość betonu. Na wytrzymałość wpływa także moc więzów między kruszywem a spoiwem (przyczepność) oraz wytrzymałość własna kruszywa. Wszystkie te rozważania prowadzą do globalnego modelu wytrzymałości na ścislenie betonu (po czasie od jednego dnia do jednego roku) zawierającego różne frakcje kruszywa, cement portlandzki, dodatki pucolanowe oraz wypełniacz wapienny. Średnia dokładność przewidywania wytrzymałości wynosi około 2–3 MPa.



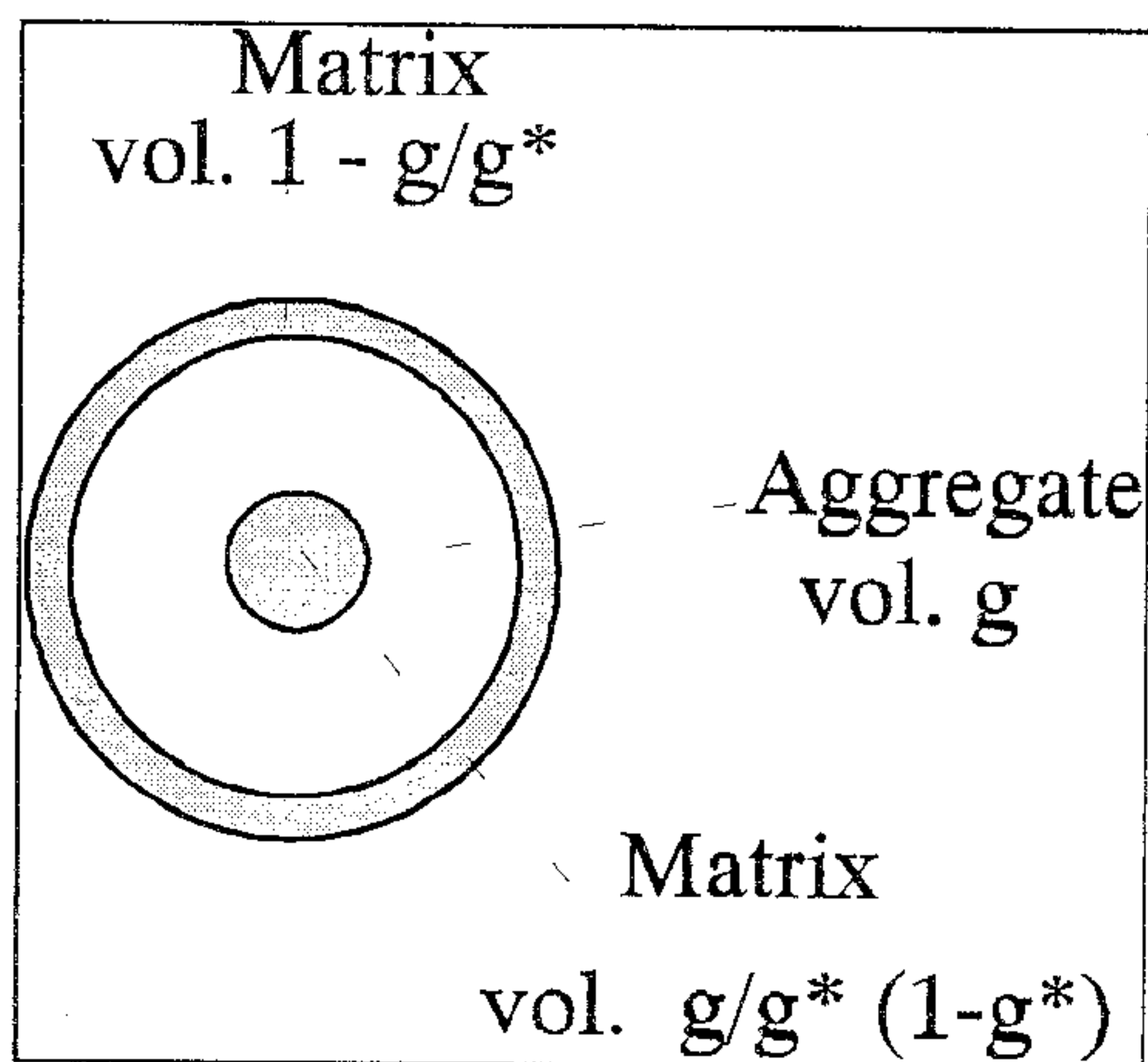
Rys. 5. Weryfikacja stosowalności modelu opadu stożka dla serii mieszanek z superplastyfikatorem; nie dokonywano żadnego dopasowania, a model był stosowany tylko dla przewidywania wartości

Fig. 5. Validation of the slump model for a series of superplasticized mixtures. No fitting was performed, and the model was used on a purely predictive manner

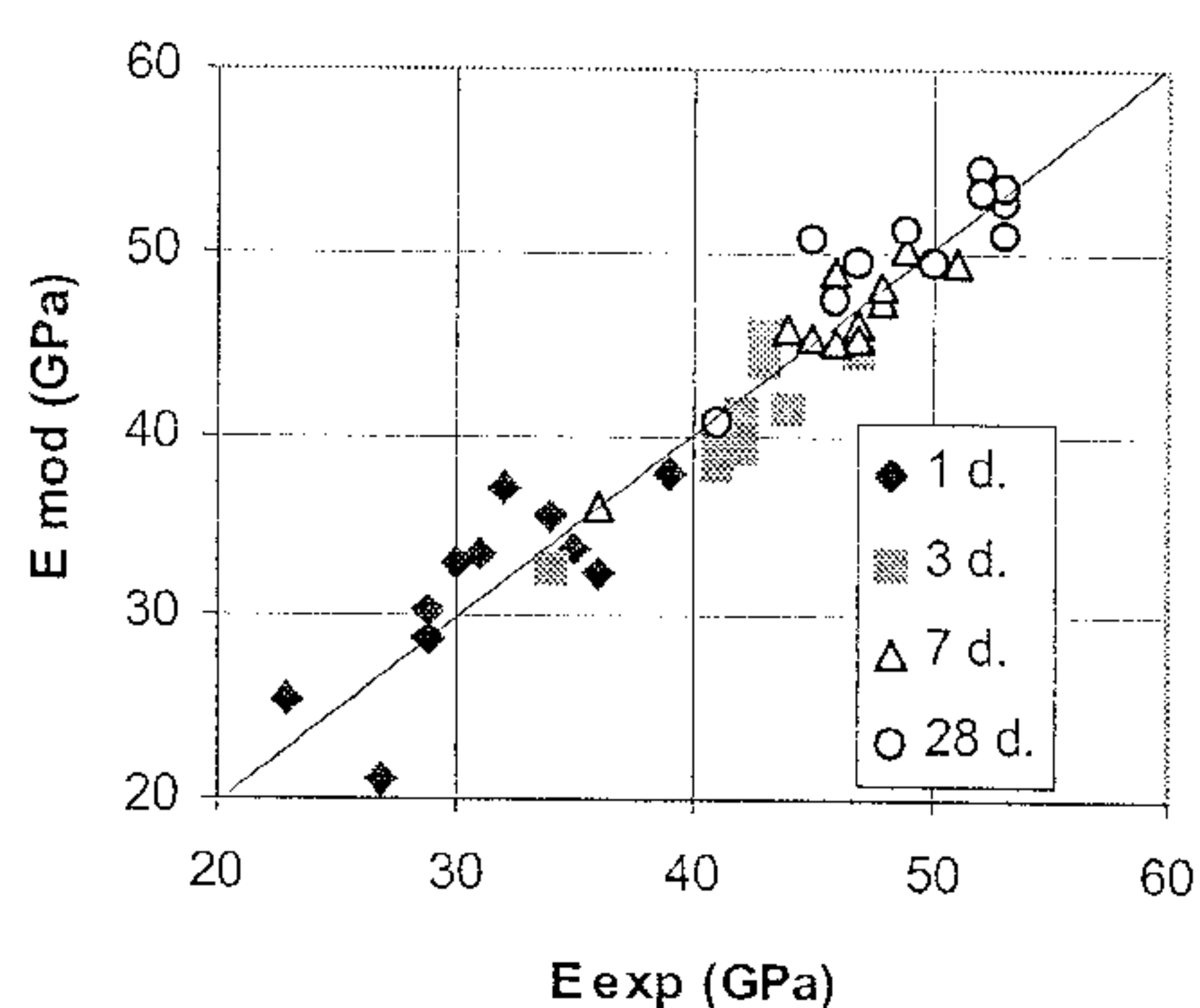
Such a high temperature may be a factor for cracking during the cooling phase, or may facilitate a delayed ettringite formation. Thus, it is important to be able to control the heat to be produced by a given concrete at the mixture-proportioning stage. The heat capacity, degree of hydration of the cement (or degree of pozzolanic reaction for fly ash or silica fume) and the heat released by a unit mass of reacted binder was evaluated. From these preliminary models, a model of adiabatic temperature rise was developed, giving a mean precision of about 2°C.

2.3.2. Compressive and tensile strength

The water-cement ratio is the most common parameter used to predict compressive strength. As a matter of fact, this parameter describes the cement concentration in the paste, which is accounted for through a power law (as in the famous Féret's formula). Once the paste is 'injected' in the voids of the granular mixture, its apparent properties are modified by the topology of the aggregate phase. More precisely, it is the mean distance between two adjacent coarse aggregates, called "Maximum paste thickness" (MPT) that is critical: the lower the MPT, the higher the strength. Moreover, the bond level between aggregate and matrix, and the intrinsic aggregate strength, also play a role. All these considerations lead to a global model for compressive strength from one day to one year of age, applying to mixtures containing aggregate fractions, Portland cement, pozzolans and limestone



Rys. 6. Trójsferyczny model dla obliczania możliwości odkształceń
Fig. 6. The triple-sphere model, for the calculation of deformability properties



Rys. 7. Przykład potwierdzenia modelu modułu E
Fig. 7. Example of validation of the model for E-modulus

Wytrzymałość na rozciąganie jest oceniana na podstawie wytrzymałości na ściskanie, tak jak jest to ujęte w większości norm konstrukcyjnych. Model zawiera jednak także i współczynnik uwzględniający rodzaj kruszywa, który pozwala zwiększyć dokładność przewidywania tej wytrzymałości.

2.3.3. Odkształcalność

Odkształcalność stwardniałego betonu jest obliczana za pomocą modelu trójsferycznego (patrz rysunek 6). Warstwa środkowa oznacza kruszywo. Matryca znajduje się w wewnętrznym jądrze i w warstwie zewnętrznej. Ta pierwsza odpowiada zaczynowi, który pozostałby w „wyciśniętej” mieszance betonowej, w której kruszywo byłoby w pełni zagęszczone. Ta druga jest więc „nadmiarem” zaczynu, który nadaje świeżej mieszance jej urabialność. Przyjmując określoną wartość ciśnienia hydrostatycznego na ten układ, można analitycznie obliczyć natychmiastowe i opóźnione odkształcenia występujące w tych stanach. Podejście to jest stosowane do przewidywania modułu sprężystości (patrz rysunek 7) oraz pełzania i pełzania przy wysychaniu. Ten sam model geometryczny pozwala na obliczenie swobodnego odkształcenia, które może być skurczem (samoczynnym lub przy wysychaniu) lub ekspansją.

Stwierdzono także, że najistotniejsze własności techniczne betonu, począwszy od mieszanki, przez jego wiek wczesny i „dojrzały” mogą być także objęte odpowiednimi modelami. Nie ma obecnie

filler. Its mean accuracy is around 2–3 MPa.

Tensile strength is evaluated from compressive strength, as in most construction codes. However, the model incorporates an aggregate coefficient, which increases its accuracy.

2.3.3. Deformability

The deformability of hardened concrete is calculated through the triple-sphere model (see Fig. 6). The intermediate layer stands for the aggregate. The matrix is distributed between an internal nucleus and an external layer. The former corresponds to the paste which would remain in the 'squeezed' fresh concrete, where the aggregate phase would be fully compacted. The latter is then the 'excess' paste which gives to the fresh mixture its workability. Applying an hydrostatic pressure to the triple-sphere, one may calculate analytically the instantaneous and delayed deformations, from those of the phases. This approach is applied to the prediction of elastic modulus (see Fig. 7), basic and drying creep. The same geometrical model allows the computation of free deformation, which can be shrinkage (autogenous or drying shrinkage) or swelling.

Finally, it is realized that most important engineering properties, dealing with concrete at fresh state, early and 'mature' age are covered with suitable models. To date, no models are available for durability. This gap will have to be filled in the future. Especially, properties like gas-permeability, chloride ion diffusivity, carbonation rate or scaling resistance will have to be quantitatively related with mixture-proportions. This constitutes an exciting challenge for all the concrete research community.

3. Example

Hereafter, a real example is presented, showing how such a scientific approach may help to solve a new problem, for which no experience is available.

3.1. Performance specifications

A high-performance concrete (HPC) was to be formulated for a specific pavement application (5). Here, the aim was to cast a thin, unbonded, continuously reinforced concrete slab over a thick, cracked cement-treated base layer. The lack of bond between the two layers was essential to avoid reflective cracking. The top layer thickness (60 mm) was determined by the constraint of steel protection against corrosion. However, a dense concrete containing silica fume was necessary to provide such a protection. The amount of coarse aggregate was imposed by the skid resistance requirement. For the sake of wear resistance, a compressive strength of 80 MPa was specified. In order to facilitate the casting process, a slump of 150 mm was required, with a suitable placeability and a limited plastic viscosity. Finally, the risk of buckling by hot weather had to be managed (since the top layer was just lying on its foundation). The remedy consisted in choosing a high-shrinkage HPC. In this case, the restraint provided by the infinite length of the pavement is assumed to keep a sufficient level of tension, even when concrete warms up to 50°C. The final set of specifications appears in Table 1. Let us point out the unusual character of this set, as compared to conventional HPC, where the maximum size of aggregate is much higher, and shrinkage is generally minimized.

modeli odnoszących się do trwałości i ta luka powinna być w przyszłości wypełniona. Szczególnie jeżeli chodzi o takie właściwości betonu jak jego przepuszczalność dla gazów, przenikanie jonów chlorkowych, prędkość karbonatyzacji lub odporność na łuszczenie. Będą one musiały być odniesione w sposób ilościowy do składu mieszanki, co stanowi ekscytujące wyzwanie dla całej społeczności naukowej zajmującej się badaniami betonu.

3. Przykład

Poniżej przedstawiony jest przykład pokazujący, w jaki sposób podejście naukowe może pomóc w rozwiązaniu nowego problemu, w odniesieniu do którego brak jest jakichkolwiek doświadczeń.

3.1. Wymagane właściwości techniczne

Należało opracować recepturę betonu wysokowartościowego (HPC) dla konkretnego zastosowania do nawierzchni (5) stanowiącej cienką, niezwiązaną z podłożem, zbrojoną w sposób ciągły, płytę betonową, ułożoną na grubej zarysowanej warstwie podkładowej wzmocnionej cementem. Wspomniany brak wiązania między obydwojema warstwami był konieczny dla uniknięcia powstania spękań odbitych. Grubość warstwy górnej (60 mm) wynikała z konieczności ochrony zbrojenia przed korozją. Dla zapewnienia tej ochrony, konieczne było ponadto zastosowanie zwarte go betonu zawierającego pył krzemionkowy. Ilość grubego kruszywa została narzucona przez konieczność uzyskania własności przeciwpoślizgowych nawierzchni. W celu zapewnienia odporności na ścieranie, wytrzymałość na ściskanie betonu ustalono jako równą 80 MPa. Dla ułatwienia procesu układania betonu wymagana była konsystencja charakteryzująca się opadem stożka równym 150 mm, odpowiednia urabialność i ograniczona lepkość plastyczna. Należało również zapobiec zjawisku wyboczenia płyty, powodowanemu wysoką temperaturą otoczenia (warstwa górna leżała wprost na podłożu). W tym celu wybrano beton HPC o wysokim skurczu. Założono w tym przypadku, że ograniczenie spowodowane przez nieskończoną długość nawierzchni pozwoli na utrzymanie odpowiedniego poziomu naprężenia, nawet jeżeli beton będzie się nagrzewał do temperatury 50°C. Pełną specyfikację wymagań podano w tabeli 1. Należy zwrócić uwagę na niezwykle zestaw wymagań w porównaniu z wymaganiami dla konwencjonalnego betonu HPC, dla którego maksymalna wielkość ziaren kruszywa jest znacznie większa, a skurcz jest generalnie minimalizowany.

Tabela 1 / Table 1

SKŁAD SPECJALNEGO BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO PRZEZNACZONEGO DO WYKONANIA NAWIERZCHNI DROGOWEJ

MIX DESIGN AND PROPERTIES OF A SPECIAL HIGH-PERFORMANCE CONCRETE FOR PAVEMENT

	Charakterystyka Specifications	Mieszanka teoretyczna Theoretical mixture	Mieszanka rzeczywista Actual mixture
Kruszywo grube 2/6 (kg/m ³) Coarse aggregate 2/6 (kg/m ³)	$D_{max} \leq 6 \text{ mm}$ 60% całkowitej ilości kruszywa 60% of total aggregate volume	935	912
Kruszywo drobne 0/4 (kg/m ³) Fine aggregate 0/4 (kg/m ³)		623	608
Cement (kg/m ³) Cement (kg/m ³)		406	408
Wypełniacz wapienny(kg/m ³) Limestone filler (kg/m ³)		101	139
Pył krzemionkowy (kg/m ³) Silica fume (kg/m ³)	10 % zawartości cementu 10 % of cement content	40,6	39
Superplastyfikator(kg/m ³) Superplasticizer (kg/m ³)		4,35	5.62
Woda (dm ³ /m ³) Water (l/m ³)		185	190
Współczynnik zagęszczenia Compaction index	≤ 7	6.9	
Opad stożka (mm) Slump (mm)	= 150	150	160
Lepkość plastyczna (Pa) Plastic viscosity (Pa.s)	≤ 350	350	120-250 ¹⁾
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach (MPa) Compressive strength at 28 d. (MPa)	= 80 MPa	80	78,1
Skurcz całkowity 50% R.H. (10 ⁻⁶) Total shrinkage at 50 % R.H. (10 ⁻⁶)	≥ 750	750	
¹⁾ po 60 minutach ¹⁾ after 60 minutes			

3.2. Mixture-proportioning

After a careful characterization of local constituents, an automatic optimization was performed with a software incorporating all models previously presented (6). The optimization criterion was the unit cost of the recipe. Simulations showed that limestone filler was helpful to match the shrinkage requirement at a limited cost. The theoretical mix-composition appears in Table 1. After the production of a trial batch, minor adjustments were carried out to obtain the required rheological properties, producing the actual recipe given in the last column of the same table. This mix-composition proved to be satisfactory.

