

## Wpływ cementowych spoiw ekspansywnych na właściwości konstrukcyjne betonu

## Influence of expansive cement binders on the structural properties of concrete

### 1. Wprowadzenie

Betony wykonywane przy użyciu cementowych spoiw ekspansywnych należą do grupy betonów specjalnych. Ich cechą szczególną jest przyrost objętości w czasie wiązania i dojrzewania. Różnią się betony o skompensowanym skurczu, w których niewielkie odkształcenia ekspansji swobodnej; do 0,1%, jedynie kompensują zachodzący skurcz oraz betony ekspansywne o większych odkształceniach. Wielkość ekspansji swobodnej betonu zależy od rodzaju i ilości zastosowanego spoiwa, a także od zawartości i właściwości kruszywa oraz od czynników technologicznych.

Wśród cementowych spoiw ekspansywnych najczęściej spotyka się cementy ekspansywne, w których wykorzystuje się reakcje związków glinosiarczanowych prowadzące do powstania ettringitu. Wzrost objętości związany jest z krystalizacją ettringitu. Proces ten nie wywołuje zmian objętości betonów, jeżeli kryształki ettringitu wypełniają dostępną przestrzeń porów, natomiast wiąże się z ekspansją, gdy powstają w objętości zajmowanej przez żel cementowy. Fizykochemia cementów ekspansywnych oraz teorie opisujące mechanizm ekspansji i metody wytwarzania cementów ekspansywnych przedstawione są w pracach (1-3).

Obok cementów ekspansywnych stosowane są także coraz powszechniej dodatki do cementu portlandzkiego zwiększające objętość zaczynu, mieszane z cementem z reguły w trakcie wykonywania zaprawy bądź mieszanki betonowej (4, 5). Wydaje się, że ze względów praktycznych to właśnie one znajdują najszersze zastosowanie.

W elementach konstrukcyjnych wykonanych z betonu ekspansywnego, na skutek ograniczenia swobody ekspansji przez więzy zarówno wewnętrzne (zbrojenie) jak i zewnętrzne (opory, podpory, przylegające elementy konstrukcyjne) powstają naprężenia wewnętrzne tak zwane samonaprężenia. Dlatego też w literaturze obok pojęcia ekspansywne betony znany jest termin beton samoprężający się lub wstępnie samoprężający się.

Powstawanie ettringitu w porach powoduje zwiększenie szczelności betonu, a co za tym idzie wzrost odporności na przenikanie wilgoci, wody, gazów, odporności na korozję i mrozoodporności. Ograniczenia zewnętrzne i zbrojenie mogą generować w samym betonie i przyległych elementach konstrukcyjnych korzystny stan naprężeń wstępnych. Racjonalne stosowanie betonu ekspansywnego polega na świadomym wykorzystaniu tych właściwości.

### 1. Introduction

Concretes made with expansive cement binders belong to the group of special concretes. Their special feature is an increase in volume during setting and curing. A distinction is made between shrinkage-compensating concretes in which little strains in free expansion (up to 0.1%) only compensate the shrinkage taking place, and expansive concretes, i.e. those with larger strains. The value of free expansion of concrete depends on the type and quantity of the binder used, as well as on the amount and characteristics of the aggregate and the technological factors.

The most frequent among expansive cement binders are those in which reactions of aluminatesulfate compounds are used, leading to the formation of ettringite. Since the increase in volume is a result of the growth of ettringite crystals, the character of the expansion can be described as structure-forming and hard phase building. It occurs first of all 'inwards', filling the available pore space, and only then outwards. The physicochemistry of expansive cements, as well as the theories describing the mechanism of the expansion and the procedures of expansive cement production, are presented in references (1-3).

Apart from expansive cements, more and more often additions to Portland cement are used, increasing the volume of the grout, mixed with cement usually at the stage of mortar or concrete mix making (4, 5). It seems that for practical reasons these additions will find the broadest application.

In structural elements made of expansive concrete, due to the confinement of the freedom of expansion by internal constraints (structure, reinforcement), as well as external ones (abutments, supports, adjacent structural elements), there are internal stresses (so-called self-stresses). That is why, apart from the notion 'expansive concrete,' there are such notions as 'self-stressed concrete' and 'chemical prestressed concrete'.

The expansion 'inwards' causes an increase in the concrete's density and tightness, and following that an increase in the resistance to damp, water, gases, corrosion and frost. External confinement, as well as reinforcement, may generate in the concrete itself and the adjacent structural elements an advantageous state of initial stresses. Rational application of expansive concrete consists in a conscious making advantages of those properties.

## 2. Charakterystyki spoiw ekspansywnych

Podstawową cechą charakteryzującą ekspansję spoiwa jest liniowe odkształcenie swobodne  $\varepsilon_{w,CE}$ , jakiego doznaje próbka prostopadłościenna nie ograniczana podczas dojrzewania i twardnienia żadnymi więzami zewnętrznymi. Jeśli ekspansja zachodzi w warunkach ograniczenia odkształceń, to będą one mniejsze; tak zwane nieswobodne  $\varepsilon_{n,CE}$ , a w próbce wystąpią samonaprężenia  $\sigma_{c,CE}$ . Dwa wymienione wyżej parametry są miarą aktywności cementu ekspansywnego. Mierzone są one w zgodny z normą sposób, opisany w pracy (3), na próbkach wykonanych z zaprawy ekspansywnej, przechowywanych przez 28 dni w wodzie. Podkreślić należy, że właściwości spoiw ekspansywnych, w tym także szybkość przyrostu odkształceń w czasie twardnienia tworzywa cementowego są pochodną nie tylko rodzaju cementu czy dodatku ekspansywnego, ale także zależą bardzo od składu chemicznego składników użytych do ich wyprodukowania.

Na rysunkach 1–3 przedstawiono przykładowe właściwości spoiw ekspansywnych, badane zgodnie z normą. I tak rysunek 1 przedstawia właściwości cementów ekspansywnych wytwarzanych w dwóch ośrodkach: w Instytucie Mineralnych Materiałów Budowlanych w Krakowie (zwany dalej cementem IMMB) oraz na skalę półtechniczną w Politechnice Lubelskiej (cementy o różnych charakterystykach). Na rysunkach 2 i 3 pokazano właściwości spoiw ekspansywnych sporządzonych przez dodanie dodatków ekspansywnych do cementu portlandzkiego. W tym przypadku istotnym parametrem wpływającym na wielkość ekspansji swobodnej jest ilość dodatku ekspansywnego w stosunku do masy cementu portlandzkiego (rysunek 4).

## 3. Właściwości betonów sporządzonych ze spoiw ekspansywnych

Podobnie jak w przypadku spoiw ekspansywnych, wielkościami charakteryzującymi betony sporządzone przy ich użyciu jest wiel-

## 2. Characteristics of expansive binders

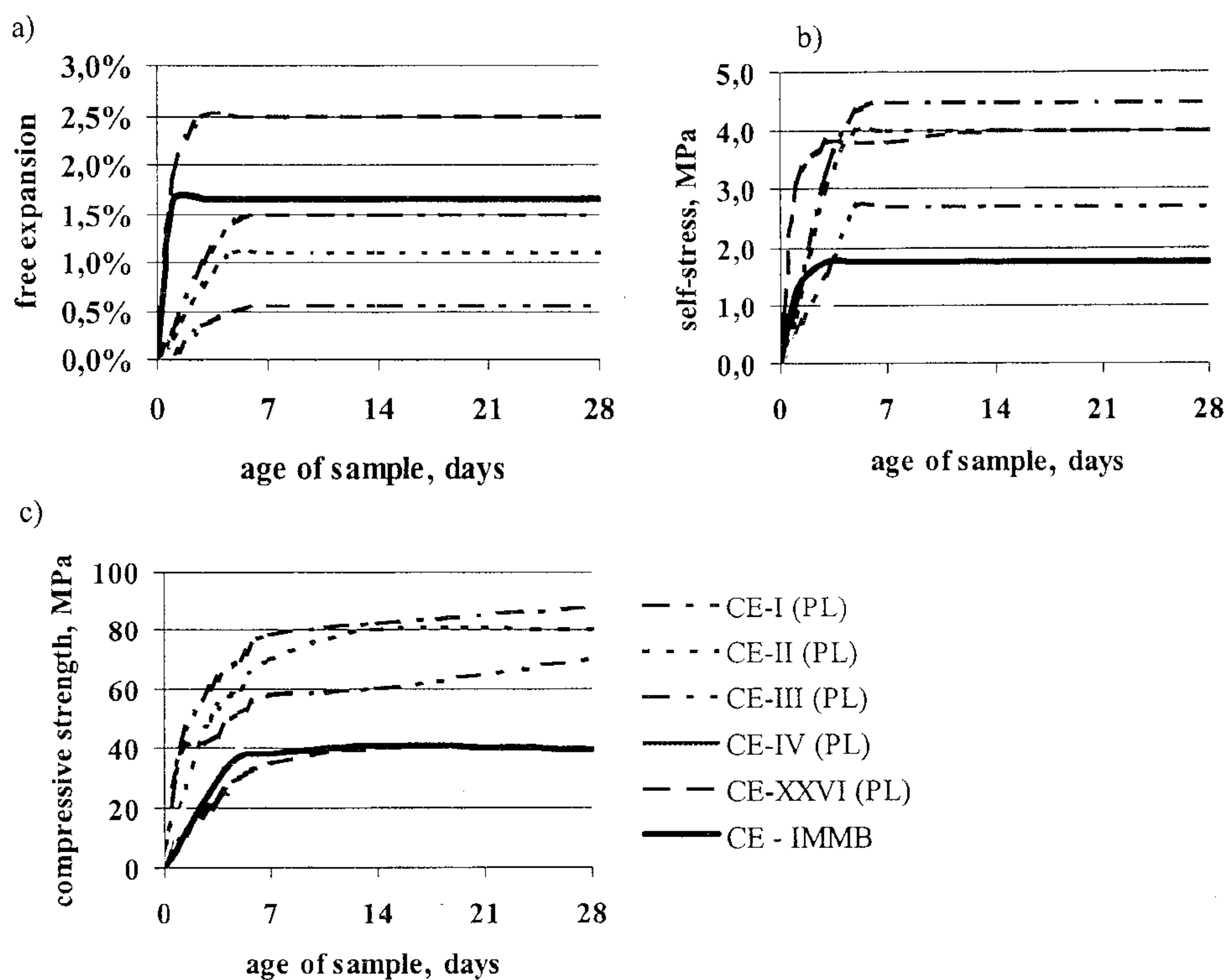
The basic feature characterising binder expansion is the free linear strain  $\varepsilon_{w,CE}$ , subject to which is a cuboid sample not confined during its curing by any external constrains. If the expansion takes place in confined freedom conditions, then smaller, so-called non-free, strains  $\varepsilon_{n,CE}$  will occur, while in the sample self-stresses  $\sigma_{c,CE}$  are generated. The two parameters mentioned above are the measure of the ergoactivity of expansive cement. They are examined in a standardised manner, described in reference (3), on the samples made of expansive mortar, kept in water for 28 days. It is to be emphasised that the characteristics of expansive binders, including the rate of strain growth during the curing of the cement material, are the result not only of the type of cement or expansive additive, but also heavily depend on the chemical composition of the components used in their production.

Figures 1–3 present exemplary characteristics of expansive binders, examined in a standard manner. Thus Fig. 1 shows the characteristics of Polish expansive cements made as a ready product in two centres: the Institute of Mineral Building Materials (further called cement IMMB), and on a semi-technical scale at the Technical University of Lublin (cements of various characteristics). Figures 2 and 3 show characteristics of expansive binders made by adding expansive additives to Portland cement. In this case an important parameter affecting the value of free expansion is the amount of expansive addition in relation to the amount of Portland cement (Fig. 4).

## 3. Properties of concretes made on the basis of expansive binders

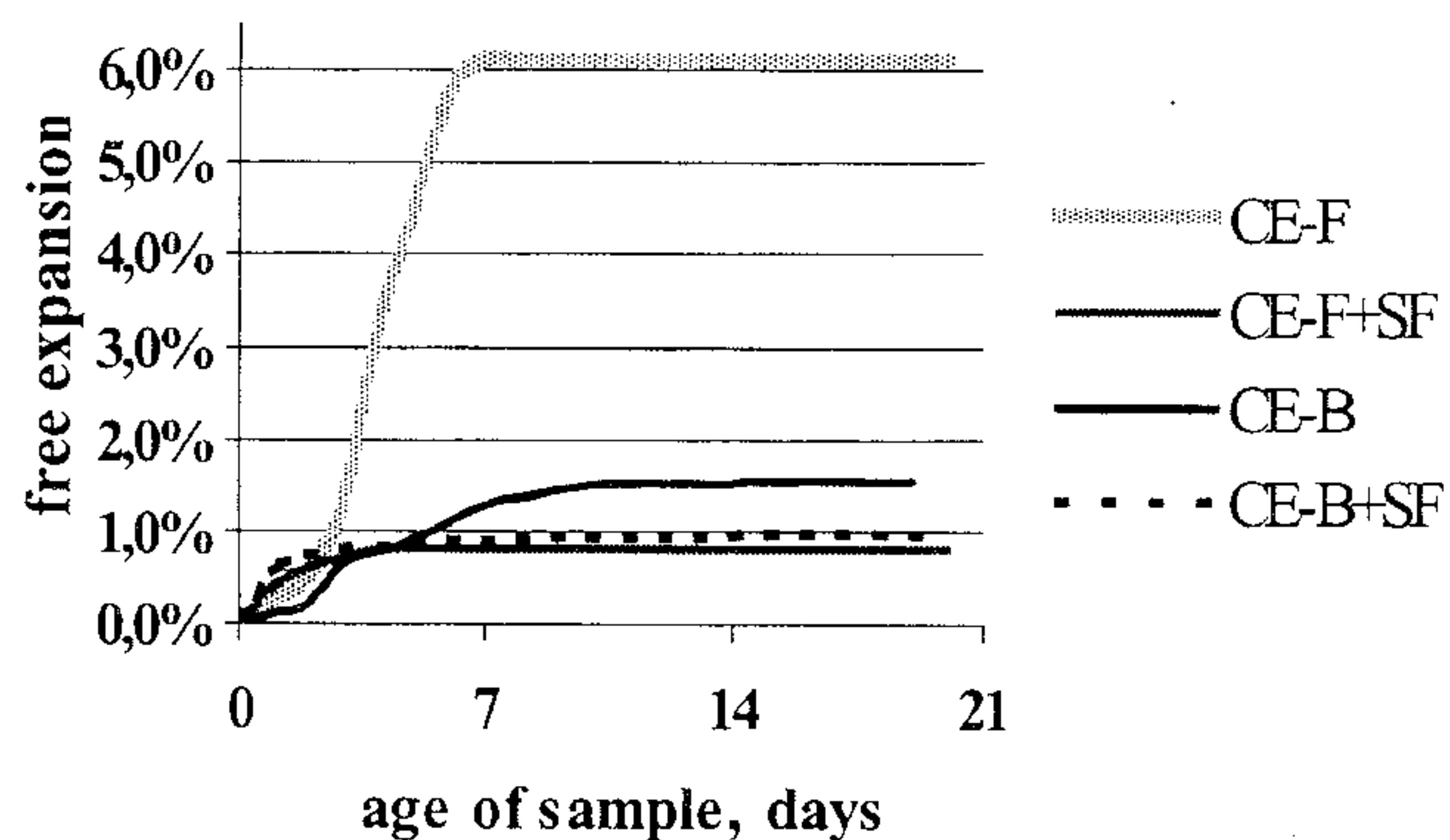
As in the case of expansive binders, the parameters characterising concretes containing them is the value of free strains and self-stresses. The value of the achieved free expansion of concrete according to (3, 7-9) depends not only on the type, activity and amount of the cement applied, but also on the amount of the aggregate used, its modulus of elasticity and grain size. The curing conditions are also of fundamental importance (Fig. 5). In turn, the value of the self-stresses, occurring due to the confinement of the freedom of expansion by both internal and external constraints, is the result, on the one hand, of cement activity, and on the other of the rigidity of the structure and of the constraints limiting the expansion. These parameters (free expansion and self-stresses of the concrete) are examined in a standardised way described in reference (3).

The expansion begins at the moment of supplying the concrete with a suitable amount of water, sufficient for starting chemical reactions. According to (3) intensive moisturising, tantamount to initiating the expansion, should be started when the strength of concrete reaches 7.5–9 MPa. If this strength is not achieved, the structure of the concrete will not be rigid enough and the expansion 'inwards' will not take place; neither will any self-stresses occur. If, on the other hand,



Rys. 1. Właściwości cementów ekspansywnych (cementy PL oraz cement IMMB): a) ekspansja swobodna, b) samonaprężenia, c) wytrzymałość na ściskanie.

Fig. 1. The characteristics of Polish expansive cements produced in Technical University of Lublin (PL) and in Institute of Mineral Building Materials (IMMB) – results of author's research: a) free expansion, b) self-stresses, c) compression strength.



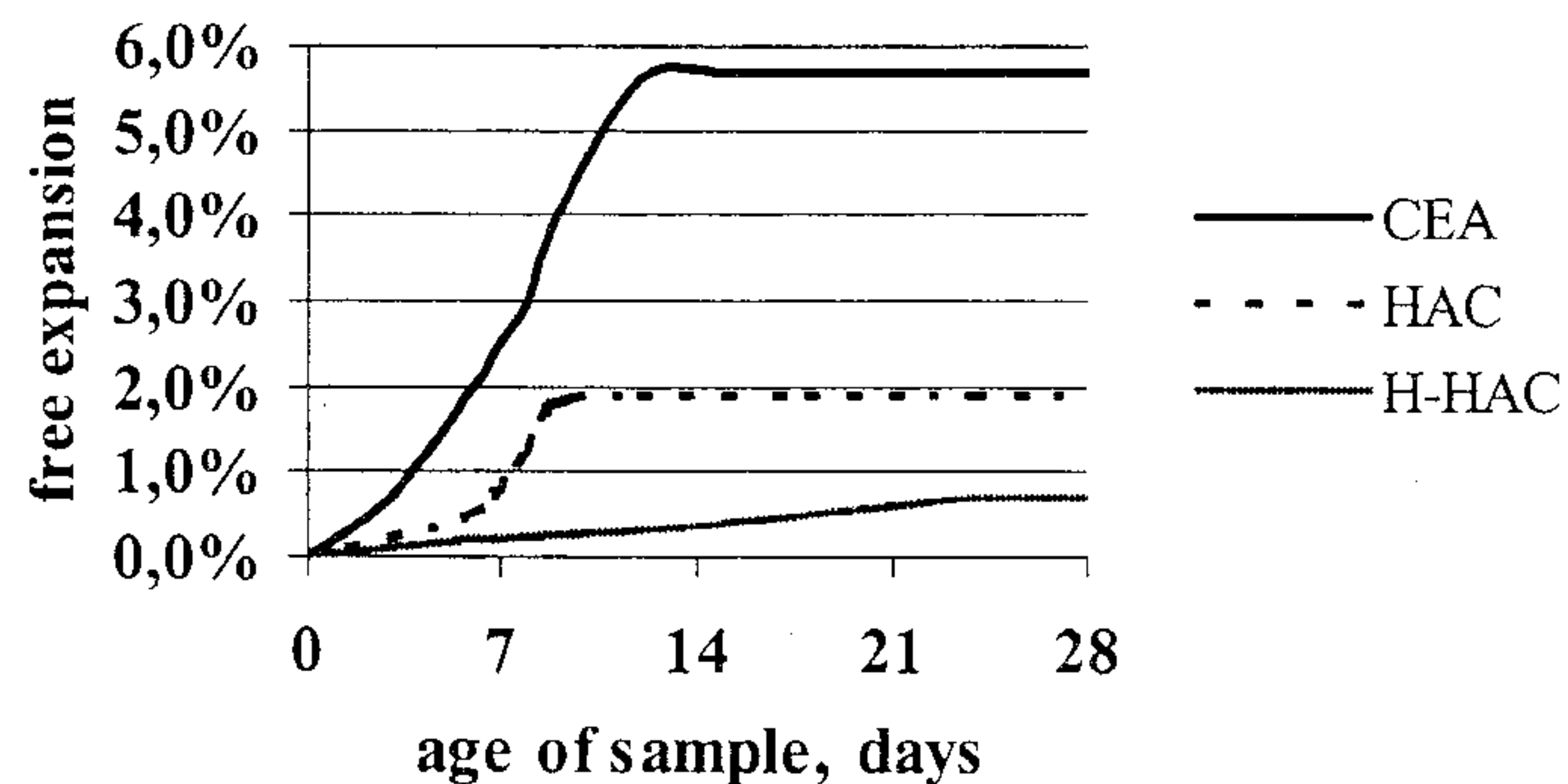
Rys. 2. Przebieg ekspansji swobodnej spoiwa z klinkierem ekspansywnym typu K (stosunek ilości klinkieru do sumy mas cementu portlandzkiego i mikrokrzemionki równy 0,4: 1) rysunek wykonano na podstawie danych (6): CE-F – spoiwo z klinkierem o ziarnach 5-8 mm, CE-B – spoiwo z klinkierem o ziarnach < 150 mm, CE-F+SF – spoiwo z klinkierem o ziarnach 5-8 mm, 15% cementu portlandzkiego zastąpiono mikrokrzemionką, CE-B+SF – spoiwo z klinkierem o ziarnach <150 mm, 15% cementu portlandzkiego zastąpiono mikrokrzemionką.

Fig. 2. The growth of free expansion during curing of binder produced with type K expansive clinker (the amount of expansive clinker in relation to the amount of sum of Portland cement and silica fume is equal to 0,4: 1) figure is based on the data of reference (6): CE-F – binder with 5-8 mm grain clinker, CE-B – binder with 150 mm grain clinker, CE-F+SF – binder with 5-8 mm grain clinker and 15% of cement was substituted by silica fume, CE-B+SF – binder with 150 mm grain clinker and 15% of cement was

kość odkształceń swobodnych i wartość samonaprężeń. Wielkość uzyskanej ekspansji swobodnej betonu według (3, 7, 8-9) zależy nie tylko od rodzaju, aktywności i ilości zastosowanego cementu, ale także od ilości kruszywa, jego modułu sprężystości i wielkości ziarn. Podstawowe znaczenie mają także warunki pielęgnacji (rysunek 5). Z kolei wartość samonaprężeń, które powstają w wyniku ograniczenia swobody ekspansji przez więzy wewnętrzne jak i zewnętrzne jest wypadkową z jednej strony aktywności cementu, z drugiej – sztywności kompozytu betonowego i sztywności więzów ograniczających ekspansję. Parametry te (ekspansja swobodna i samonaprężenia betonu) badane są w zgodny z normą sposób opisany w pracy (3).

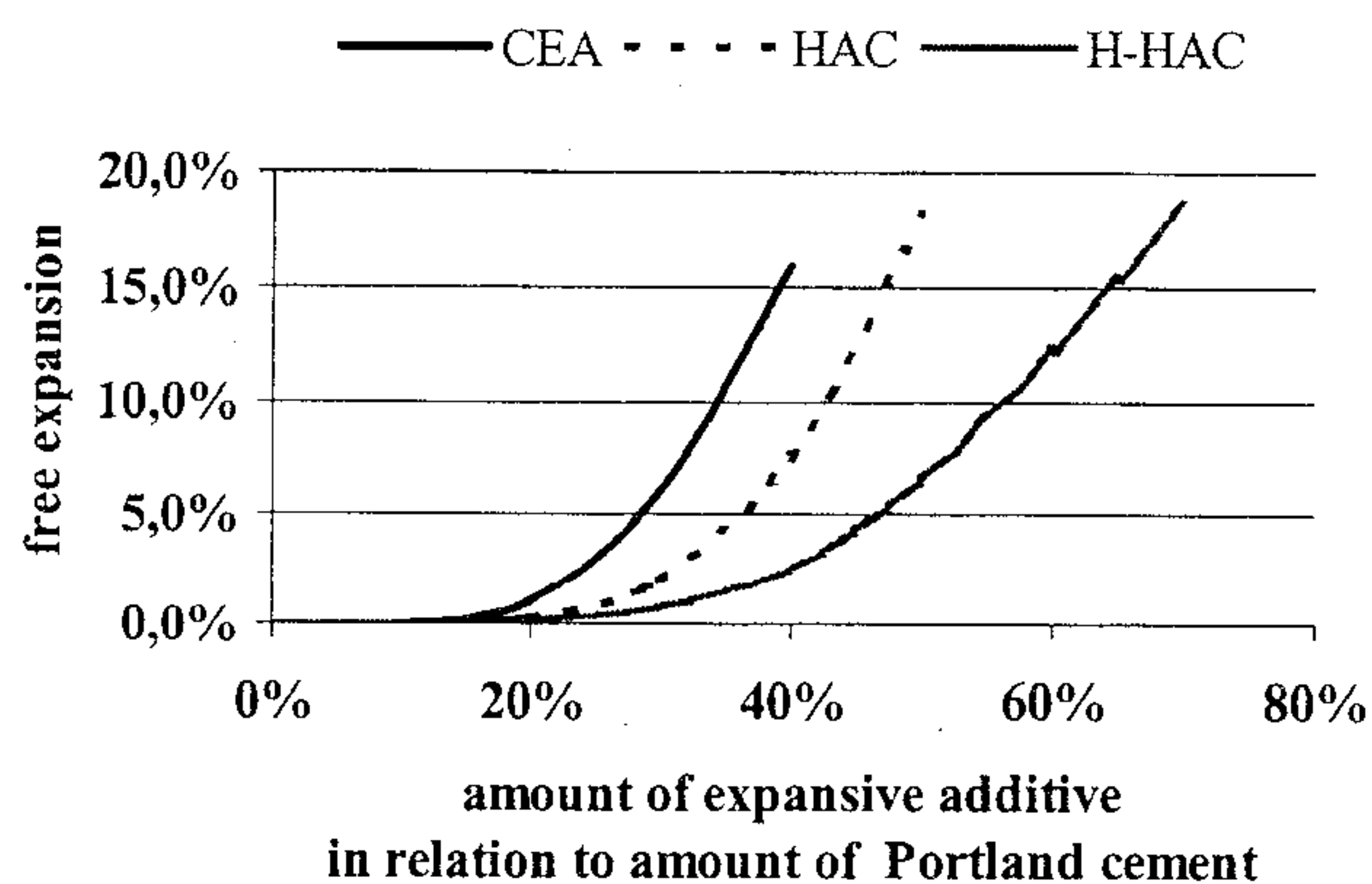
Według (3) pielęgnacja wilgotnościowa winna być rozpoczęta, się gdy beton osiągnie wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 7,5–9 MPa. Jeśli wytrzymałość ta nie zostanie osiągnięta – beton będzie wykazywał właściwości plastyczne i powstające naprężenia będą rozładowywane w odkształceniach plastycznych. Jeśli natomiast produkty hydratacji powodujące rozszerzanie się tworzywa wystąpią po osiągnięciu zbyt dużej jego wytrzymałości, to pod ich działaniem wystąpią znaczne samonaprężenia mogące spowodować w skrajnym przypadku zniszczenie betonu. Dlatego ostateczna wielkość ekspansji zarówno swobodnej jak i nieswobodnej zależy od wytrzymałości betonu w chwili rozpoczęcia pielęgnacji wilgotnościowej.

W przypadku projektowania elementów zbrojonych z betonu ekspansywnego z uwzględnieniem wstępnego stanu naprężeń, niezbędna jest znajomość zależności wartości samosprężania od stopnia zbrojenia. Zależność ta ma taki przebieg, że w przy w przypadku przekroczenia stopnia zbrojenia  $\rho_1 = 1\%$  obserwuje się wolniejszy przyrost, a następnie nawet brak przyrostu wartości samosprężania (rysunek 6). Więzy zewnętrzne są wtedy na tyle silne, że generowane są większe naprężenia wewnętrzne w tworzywie przy stosunkowo mniejszym przyroście odkształceń nieswobodnych. Kolejną wartością graniczną stopnia zbrojenia jest  $\rho_1 = 3\%$ , gdy zaczynają dominować odkształcenia poprzeczne, co może prowadzić do zarysowania elementu betonowego.



Rys. 3. Przebieg ekspansji swobodnej spoiwa sporządzonego przy użyciu różnych dodatków ekspansywnych (stosunek ilości dodatku do cementu portlandzkiego 0,3: 1) komponowanych przez autorów pracy (4): CEA – dodatek z cementu glinowego, gipsu i wapna, HAC – dodatek z cementu wysokoglinowego, półwodnego siarczanu wapnia i wapna hydratyzowanego, H-HAC – dodatek ze wstępnie hydratyzowanego cementu wysokoglinowego, półwodnego siarczanu wapnia i wapna hydratyzowanego.

Fig. 3. The growth of free expansion during curing of binders produced with different expansive additives (the amount of expansive additive in relation to the amount of Portland cement is equal as 0,3: 1) compound by authors of reference (4): CEA – additive based of high alumina cement, gypsum and lime, HAC – additive based on high alumina cement, calcium sulphate hemihydrate and hydrated finishing lime, H-HAC – additive based on hydrated high alumina cement, calcium sulphate hemihydrate and hydrated finishing lime.

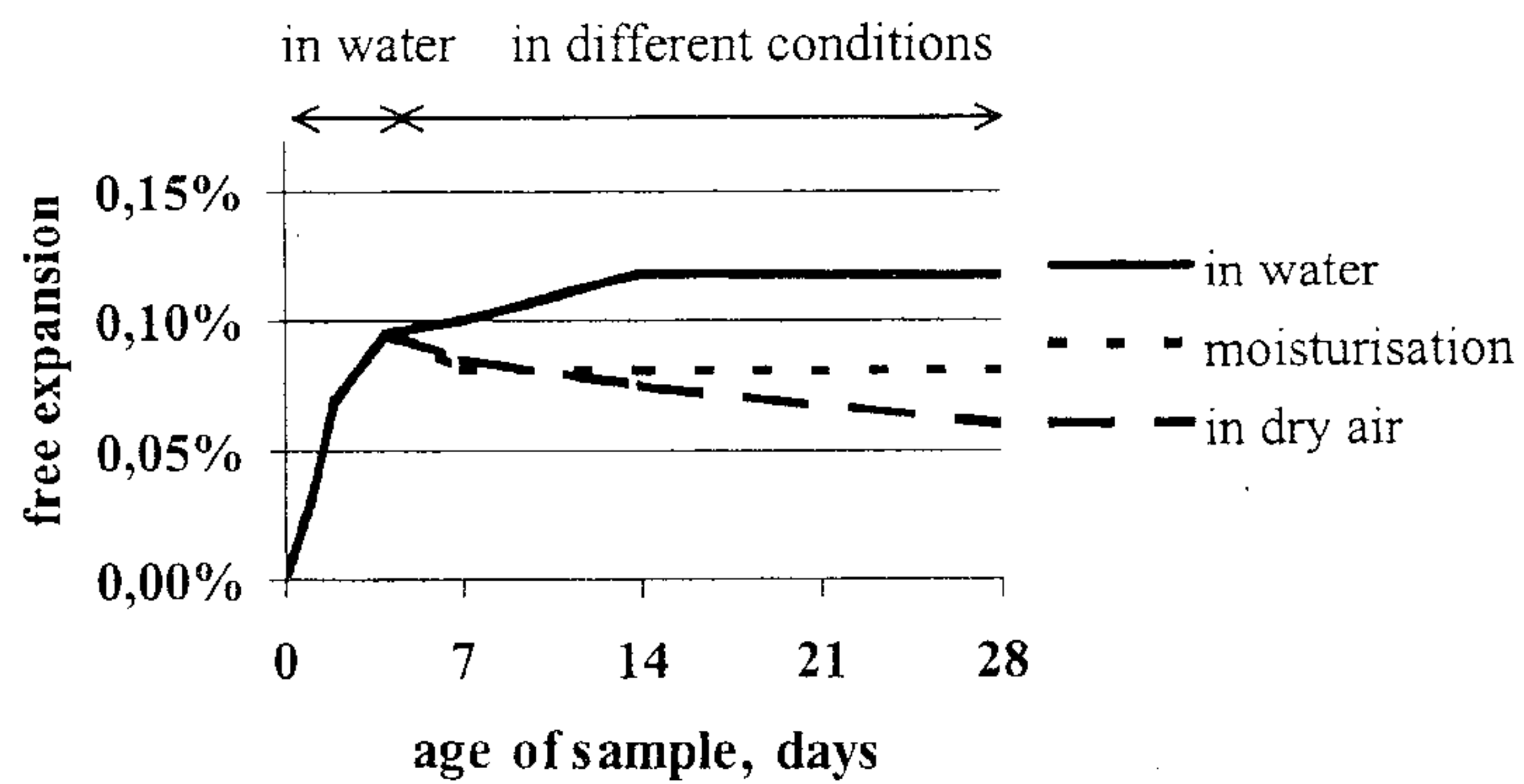


Rys. 4. Zależność ekspansji swobodnej cementu ekspansywnego od procentowej zawartości dodatku ekspansywnego w stosunku do cementu portlandzkiego (4) (opis dodatków jak na rysunku 3).

Fig. 4. The relationship of free expansion of expansive binder and the amount of expansive additive (4) (description of additives is the same as on Fig. 3).

the hydration products, causing the expandability of the structure, appear after reaching too much instantaneous strength, then, under their influence, considerable self-stresses will occur, in an extreme case able to cause the destruction of the concrete structure. That is why the ultimate value of both free and non-free expansion depends on the strength of the concrete at the moment of starting the expansion.

In the case of designing of reinforced elements of expansive concrete, taking into consideration the initial state of stresses, it is necessary to know the relationship of the self-stress value and the reinforcement ratio. What is characteristic of this relationship is the fact that above the reinforcement ratio  $\rho_1 = 1\%$  a slower growth and then even no increase of the self-stresses value takes place (Fig. 6). The external constraints are then strong enough for larger inner stresses to be generated in the structure, with a relatively slower growth of non-free strains. Another boundary value of the reinforcement ratio is  $\rho_1 = 3\%$ , when transverse strains begin



Rys. 5. Przebieg ekspansji swobodnej betonów sporządzonych przy użyciu dodatku ekspansywnego dojrzewających do 4 dnia w wodzie, a następnie w różnych warunkach (9).

Fig. 5. The growth of free expansion of concrete made with expansive additives cured in water during four days and in different conditions afterwards (9).

Dane literaturowe pozwalające na obliczenie powyższych zależności są skromne. W pracy (10) podano funkcjonalną zależność ekspansji nieswobodnej betonu  $\varepsilon_{cn,CE}$  od stopnia zbrojenia  $\rho_l$  w postaci:

$$\varepsilon_{cn,CE} = m \cdot \rho_l^{-n} \quad [1]$$

gdzie:  $m$  i  $n$  są współczynnikami empirycznymi.

Natomiast według (3), obliczając samospężanie elementu zbrojonego należy wartość samonapężenia, zmierzoną zgodnie z normą (stopień zbrojenia równy 1%, zbrojenie bez przyczepności), pomnożyć przez współczynnik  $k_p$ :

$$k_p = \sqrt{\frac{1,57 \cdot \rho_l}{0,0057 + \rho_l}} \quad [2]$$

Król (3) przytacza także na podstawie literatury rosyjskiej wzór opisujący wartość samospężania  $\sigma_{c,CE}$  w zależności od wielkości ekspansji nieswobodnej  $\varepsilon_{cn,CE}$ :

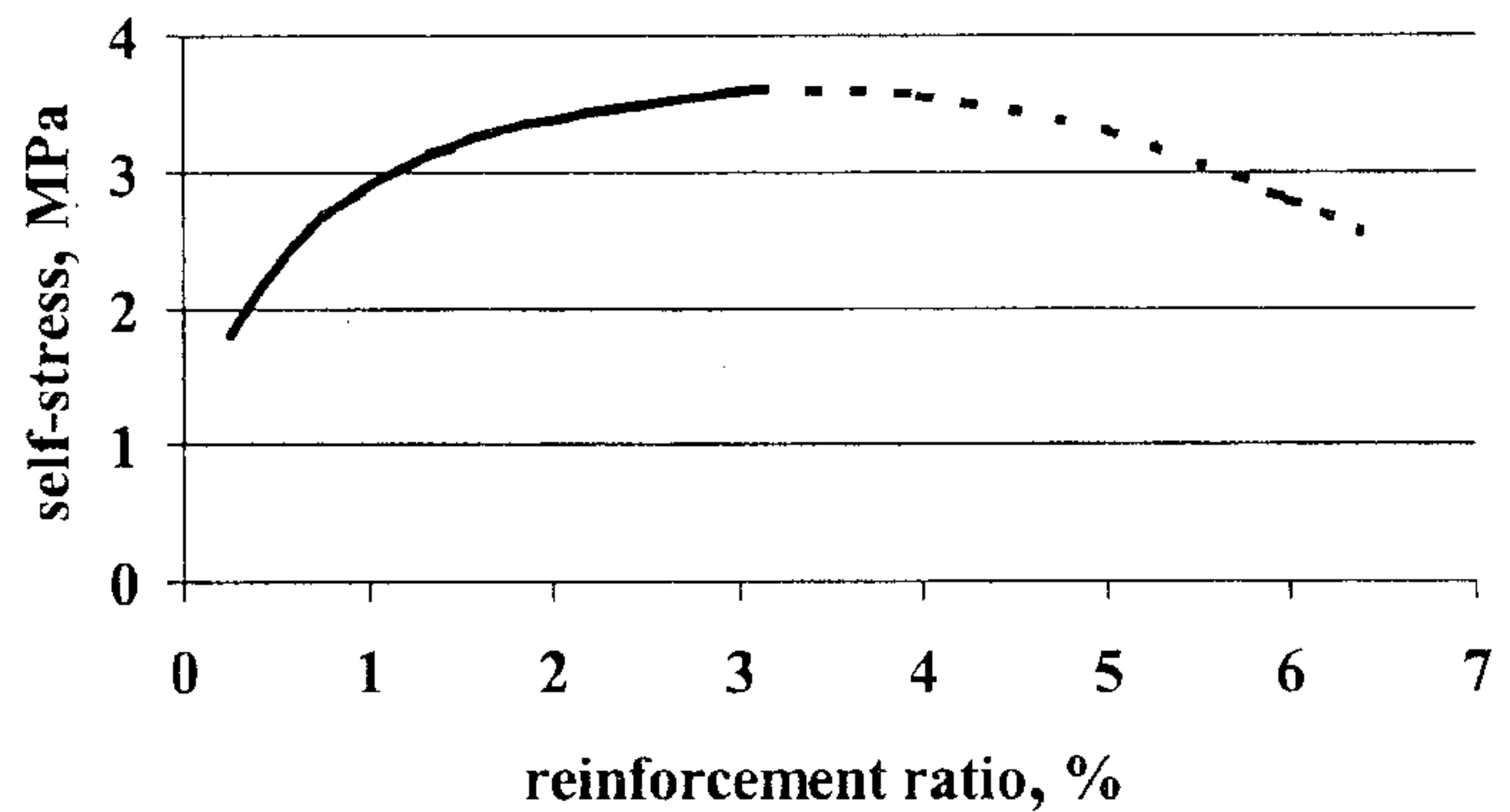
$$\sigma_{c,CE} = \alpha \cdot (f_{ce,CE})^{1,25} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{cn,CE}}\right)^{0,25}, \quad [3]$$

gdzie:  $f_{ce,CE}$  jest wartością samonapężenia badaną zgodnie z normą,  $\alpha$  jest współczynnikiem empirycznym.

Wskazówką mogą też być proste pokazane na rysunku 7. Obrazują one zależność pomiędzy ekspansją nieswobodną badaną na próbkach w sposób standardowy, a wielkością ekspansji takiego samego betonu w konstrukcji przy różnych stopniach zbrojenia. Dotyczą one jednakże tylko betonów o skompensowanym skurczu.

#### 4. Badania ekspansji zbrojonych betonów ekspansywnych

W celu oceny wpływu zbrojenia na wartość odkształceń nieswobodnych w zbrojonych elementach z betonu ekspansywnego wykonano badania na próbkach z betonu sporządzonego z cementu IMMB. Skład 1 m<sup>3</sup> betonu był następujący: cement ekspansywny – 600 kg, kruszywo grube do 16 mm – 950 kg, piasek 600 kg i woda – 220 l. Wykonano cztery serie próbek pryzmatycznych o wymiarach 100 x 100 x 400 mm, po trzy próbki w każdej serii (rysunek 8): próbki bez zbrojenia, próbki z zabetonowanym podłużnym prętem ze stali żebrowanej 8 mm (stopień zbrojenia  $\rho_l = 0,5\%$ ), próbki zbrojone podłużnym prętem ze stali żebrowanej



Rys. 6. Wpływ stopnia zbrojenia osiowego na wartość samospężania betonu ekspansywnego z cementu typu K (10).

Fig. 6. The influence of axial reinforcement ratio on self-stresses of type K expansive cement (10).

to dominate, which may lead to a crack in the element.

Literature data allowing an analytical grasp of the above relationships are modest. Reference (10) gives a functional relationship of the non-free expansion of concrete  $\varepsilon_{cn,CE}$  and the reinforcement ratio  $\rho_l$  in the formula:

$$\varepsilon_{cn,CE} = m \cdot \rho_l^{-n} \quad [1]$$

where  $m$  and  $n$  are empirical coefficients. According to (3), on the other hand, when calculating the self-stresses of a reinforced element, the value of self-stresses, measured in a standard way (reinforcement ratio equal to 1%, reinforcement without adhesion), should be multiplied by the coefficient  $k_p$ :

$$k_p = \sqrt{\frac{1,57 \cdot \rho_l}{0,0057 + \rho_l}} \quad [2]$$

Reference (3), following the Russian literature, also quotes a formula describing the value of self-stresses  $\sigma_{c,CE}$  depending on the value of non-free expansion  $\varepsilon_{cn,CE}$ :

$$\sigma_{c,CE} = \alpha \cdot (f_{ce,CE})^{1,25} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{cn,CE}}\right)^{0,25}, \quad [3]$$

where  $f_{ce,CE}$  is the self-stresses value examined in a standard way, and  $\alpha$  is an empirical coefficient. An indication could also be the graphs in Fig. 7. They show the relations between non-free expansion examined on samples in a standard way, and the value of expansion obtainable from the same concrete in structure with different reinforcement ratios. However, they concern only concretes with compensated shrinkage.

#### 4. Author's research of reinforced expansive concretes

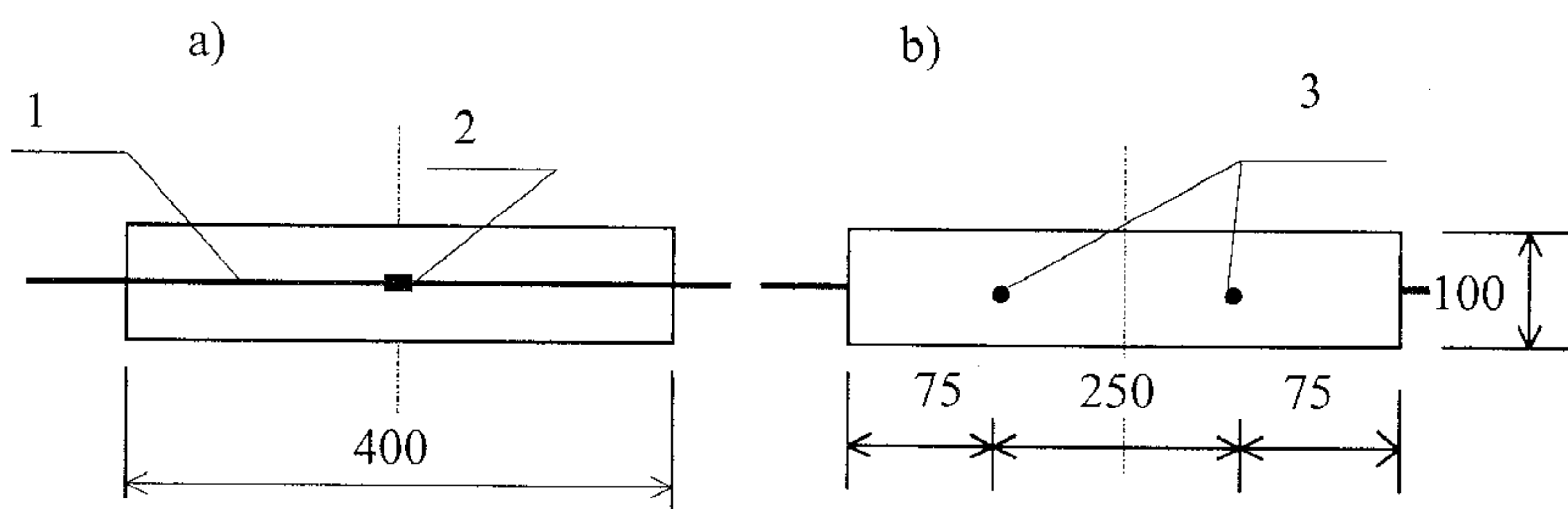
In order to evaluate the influence of reinforcement on the value of non-free strains in reinforced elements of expansive concrete, research was carried out on the samples of concrete prepared on the basis of IMMB cement. The composition of 1 m<sup>3</sup> of concrete was as follows: expansive cement – 600 kg, coarse aggregate up to 16 mm – 950 kg, sand – 600 kg and water – 220 l. Four series of prismatic samples were carried out, measuring 100 x 100 x 400 mm, three samples in each series (Fig. 8): samples without reinforcement, samples with a longitudinal rod of 8 mm ribbed steel embedded in the concrete (ratio of reinforcement  $\rho_l = 0,5\%$ ), samples with an longitudinal rod of 12 mm ribbed steel ( $\rho_l = 1\%$ ), samples

o średnicy 12 mm ( $\rho_1 = 1\%$ ) i próbki zbrojone podłużnym prętem ze stali żebrowanej o średnicy 16 mm ( $\rho_1 = 2\%$ ). Na prętach zbrojeniowych, w środku długości, naklejono tensometry elektrooporowe do pomiaru ich odkształceń.

Zagęszczone wibrowaniem próbki dojrzewały w formach przez 8 godzin, po czym wyjęto je z form i na dwóch przeciwległych bokach naklejono repery tworzące bazy pomiarowe do pomiaru odkształceń betonu. Natomiast wykonane równolegle próbki kostkowe o wymiarach 100 x 100 x 100 mm służyły do kontroli narastania wytrzymałości. Po 20 godzinach dojrzewania beton osiągnął wytrzymałość na ściskanie 8,5 MPa. Po tym okresie rozpoczęto nawilżanie próbek i w tym celu okryto je tkaniną bawełnianą nawilżaną co 2 godziny. Nawilżanie to prowadzono przez 7 dni, a przez następne 7 dni prowadzono dalszą pielęgnację próbek, jednak nawilżając je mniej intensywnie. W okresie od 14 do 28 dnia próbki przechowywano w powietrzu o naturalnej wilgotności.

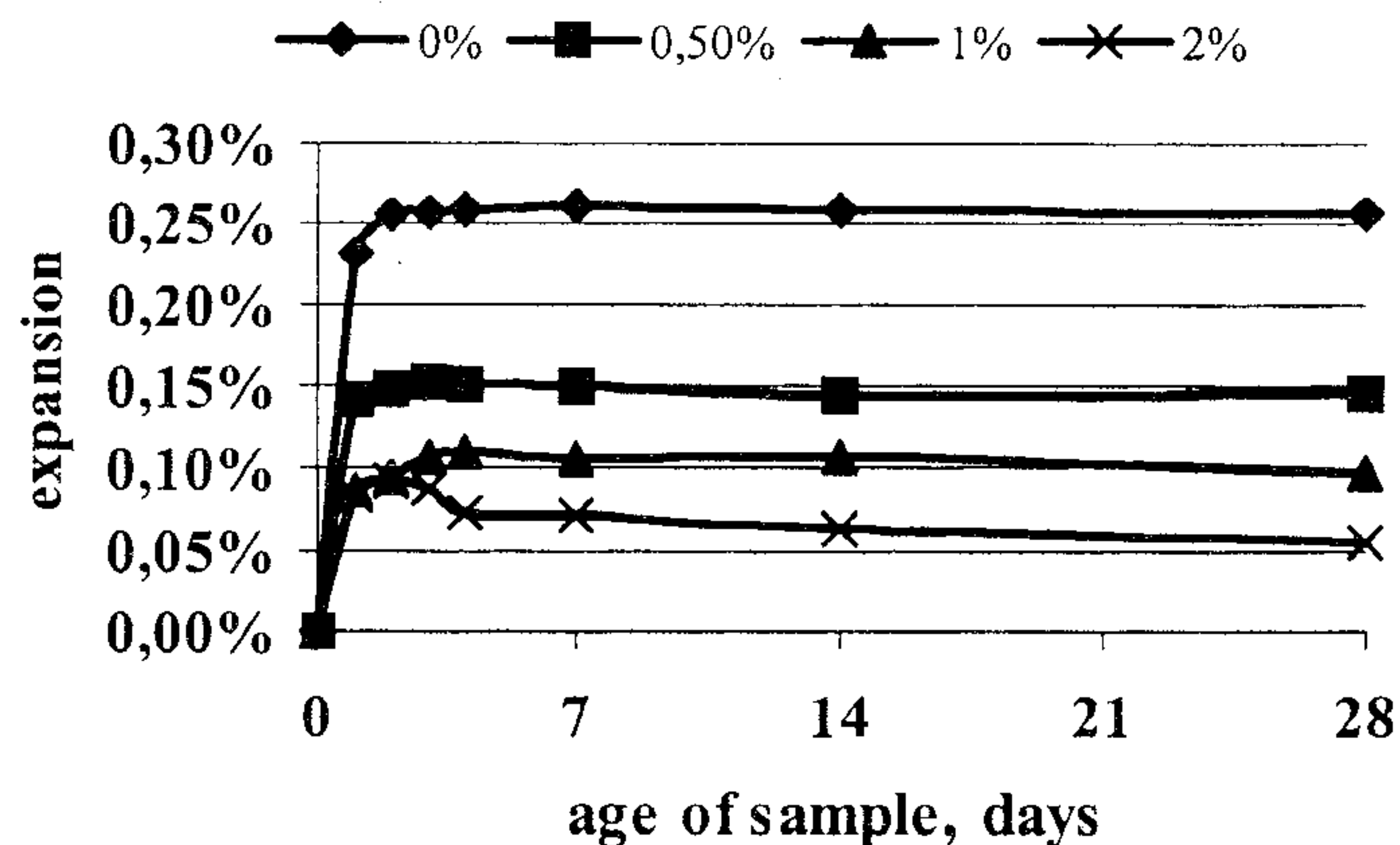
Podczas dojrzewania betonu przez 28 dni prowadzono pomiary odkształceń betonu na bazach reperów za pomocą ekstensometru nasadowego o dokładności 0,001 mm, a ich wyniki przedstawiono w tabelicy 1 oraz na rysunku 9. Równocześnie wykonywano pomiary odkształceń prętów zbrojeniowych za pomocą tensometrów elektrooporowych. Wyniki tych pomiarów oraz obliczone na ich podstawie wartości naprężeń rozciągających w prętach zbrojeniowych  $\sigma_s$  zamieszczono również w tabelicy 1. Podano w niej także wartości samonaprężeń panujących w próbce o stopniu zbrojenia  $\rho_1$  obliczone na podstawie wyrażenia:

$$\sigma_{c,CE} = \sigma_s \cdot \rho_1. \quad [4]$$



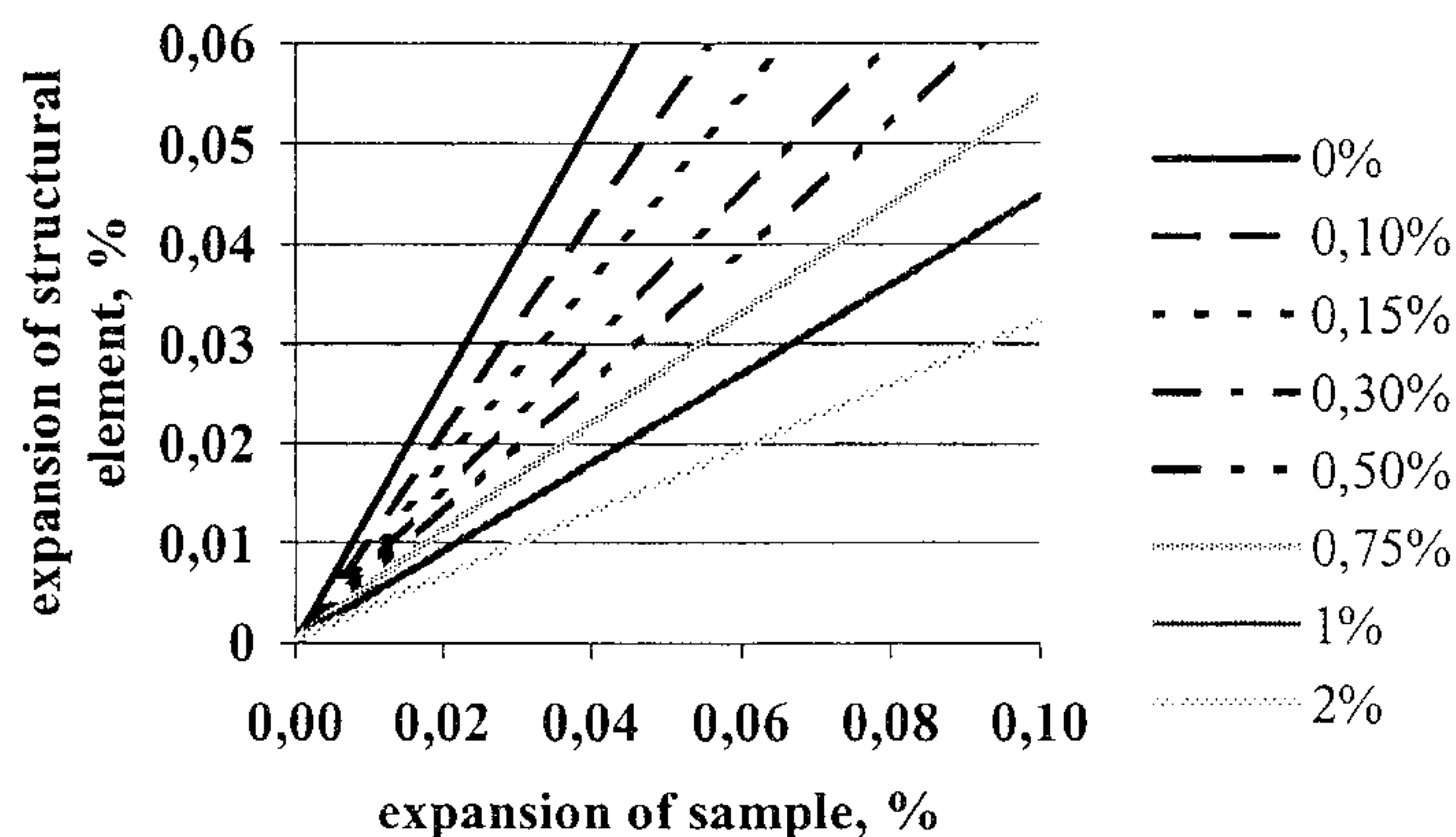
Rys. 8. Próbki do badań ekspansji nieswobodnej: a) przekrój podłużny, b) widok z boku; 1 – zbrojeniowy centralny pręt stalowy, 2 – tensometr elektrooporowy naklejony na pręcie stalowym, 3 – repery naklejone na powierzchni próbki do pomiarów odkształceń.

Fig. 8. The samples used in research of non-free expansion: a) longitudinal section, b) side view: 1 – reinforcement rod, 2 – electric resistance wire strain gauges fastened to rod, 3 – bench-marks glued to sample's surface for concrete strains measuring.



Rys. 9. Ekspansja nieswobodna próbek betonu o różnym stopniu zbrojenia wykonanych z cementu ekspansywnego IMMB.

Fig. 9. Non-free expansion of samples with different reinforcement ratio, made of concrete based on IMMB expansive cement.



Rys. 7. Zależność ekspansji nieswobodnej elementu konstrukcyjnego od wielkości ekspansji nieswobodnej mierzonej zgodnie z normą i od stopnia zbrojenia, w betonach o skompensowanym skurczu (7).

Fig. 7. Relationship between non-free expansion in the concrete structure, non-free expansion examined in standard fashion and reinforcement ratio in shrinkage compensating concretes (7).

with a longitudinal rod of 16 mm ribbed steel ( $\rho_1 = 2\%$ ). Half way along the reinforcement rods electric resistance wire strain gauges were fastened to measure their strains.

Encased and vibrated samples were cured for 8 hours, then demoulded and on two opposite sides bench-marks were stuck, providing measurement bases for measuring concrete strains. Then on the cubic samples, carried out in parallel, of dimension 100 x 100 x 100 mm, the increase of strength was measured. After 20 hours of curing, the concrete reached compression strength of 8.5 MPa. Then the process of expansion was started by beginning an intensive moisturising of the samples (which were covered with a cotton cloth moisturised every 2 hours). Intensive moisturising lasted 7 days, and then further, less intensive moisture curing was applied. Between the 14th and 28th day the samples were kept in natural air humidity.

For 28 days during the curing of the concrete, measuring of its strains were carried out on the bench-mark bases by means of an extensometer with precision of up to 0.001 mm. Their results are presented in Table 1 and Figure 9. At the same time, strain measuring of the reinforcement were carried out by means of electric resistance wire strain gauges. The results, as well as the values of tensile stress  $\sigma_s$  in the reinforcement calculated on their basis, can also be found in Table 1.

The table also contains values of self-stresses in a sample with the  $\rho_1$  reinforcement ratio, calculated on the basis of the formula:

$$\sigma_{c,CE} = \sigma_s \cdot \rho_1. \quad [4]$$

The results of the study contribute to the observation that the achieved free expansion values of concrete without reinforcement, amounting to 0.257%, are over 6 times lower than the strains of samples of normative mortar, made by means of the same expansive cement cured in water (Fig. 1). What was revealed here was, as described earlier, the influence of the aggregate and of the curing procedure.

Figure 10 shows the relationship between non-free expansion and the ratio of sample reinforcement. One can observe here the right tendency towards a decrease in non-free expansion with an increase in reinforcement, and at larger reinforcement ratios the decrease is less pronounced. However, in analysing the course of the curve it

Na podstawie wyników badań stwierdzić można, że uzyskane wartości ekspansji swobodnej betonu niezbrojonego 0,257% są ponad 6 razy mniejsze niż odkształcenia próbek z normowej zaprawy wykonanych przy użyciu tego samego cementu ekspansywnego, dojrzewających w wodzie (rysunek 1). Ujawnił się tu, jak wcześniej opisano, wpływ kruszywa oraz wpływ sposobu pielęgnacji.

Na rysunku 10 przedstawiono zależność ekspansji nieswobodnej od stopnia zbrojenia próbek. Zachowana jest tu oczekiwana tendencja spadku ekspansji nieswobodnej wraz ze wzrostem ilości zbrojenia, a przy większych stopniach zbrojenia spadek ten jest mniejszy. Jednak analiza przebiegu wykresu wykazuje, że w badanym zakresie stopni zbrojenia jest on lepiej opisany krzywą wykładniczą w postaci  $\epsilon_{cn,CE} = a \cdot e^{-b \cdot \rho_l}$  niż wyrażeniem [1]. Metodą najmniejszych kwadratów ustalono dla badanego betonu wartości współczynników;  $a = 0,23$ ,  $b = 75$ .

## 5. Uwagi końcowe

1. Znajomość wartości ekspansji swobodnej spoiwa, podawanej zwykle przez producenta, nie jest wystarczająca do jednoznacznego prognozowania ekspansji betonu sporządzonego przy jego użyciu. Ekspansja swobodna betonu jest nawet kilkakrotnie mniejsza od ekspansji spoiwa (w przypadku badań własnych – ponad 6 razy). Jej wartość zależy w dużym stopniu od udziału i cech kruszywa oraz od warunków pielęgnacji betonu i jego wytrzymałości w chwili wystąpienia ekspansji.
2. Badania elementów zbrojonych z betonu ekspansywnego IMMB pozwoliły ustalić zależność wielkości ekspansji nieswobodnej tego betonu od stopnia zbrojenia. Zależność tę, w zakresie badanych stopni zbrojenia, można opisać funkcją wykładniczą.

## Literatura / References

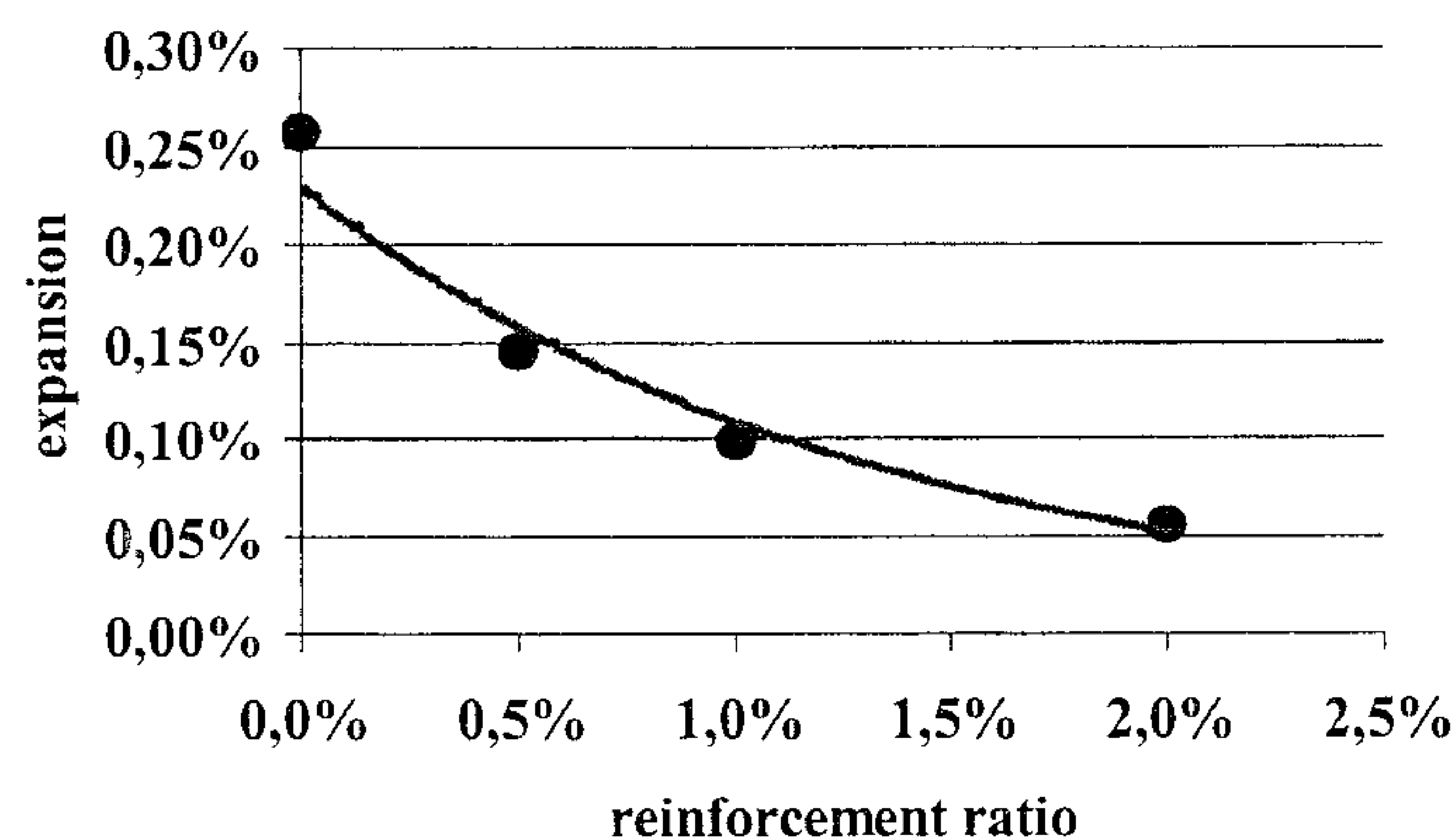
1. W. Kurdowski, Chemia cementu. PWN, Warszawa 1991.
2. S. Peukert, Cementy powszechnego użytku i specjalne. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000.
3. M. Król, W. Tur, Beton ekspansywny. Arkady, Warszawa 1999.
4. Y. Fu, J. Ding, J. J. Beaudoin, Cem. Concr. Res. Vol. 25, No. 6, 1295 (1995).
5. S. Nagataki, H. Gomi, Cem. Concr. Comp. 20, 163 (1998).
6. C. Lobo, Cohen M.D., ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 5, 481 (1992).
7. ACI 223-98 Standard Practice for Use of Shrinkage-Compensating Concrete, ACI 1998.
8. A. M. Neville, Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000.
9. E. Tazawa, K. Kawai, K. Miyaguchi, Cem. Concr. Comp. 22, 121 (2000).
10. Expansive Cement Concrete - Present State of Knowledge. Report ACI Committee 223, ACI Journal, Vol. 67, No. 8, 583 (1970).

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI BADAŃ PRÓBEK Z BETONU EKSPANSYWNEGO O RÓŻNYM STOPNIU ZBROJENIA (WARTOŚCI ŚREDNIE Z TRZECH PRÓBEK).

RESULTS OF RESEARCH OF EXPANSIVE CONCRETE SAMPLES WITH DIFFERENT REINFORCEMENT RATIO (AVERAGE OF THREE SAMPLES).

| Stopień zbrojenia próbki<br>Ratio of reinforcement  | $\rho_l = 0\%$ | $\rho_l = 0,5\%$ | $\rho_l = 1\%$ | $\rho_l = 2\%$ |
|---|----------------|------------------|----------------|----------------|
| Ekspansja maksymalna, %<br>The maximal value of expansion, %  | 0,261          | 0,153            | 0,111          | 0,092          |
| Ekspansja po 28 dniach, %<br>Expansion after 28 days, %   | 0,257          | 0,145            | 0,098          | 0,055          |
| Odkształcenie pręta zbrojeniowego po 28 dniach, $\epsilon_s$ , %<br>Strain of reinforcement after 28 days, $\epsilon_s$ , % |                | 0,05             | 0,035          | 0,02           |
| Naprężenia w pręcie/Stress of reinforcement, MPa<br>$\sigma_s = \epsilon_s \cdot E_s$                                       |                | 105              | 73,5           | 42             |
| Samonapężenia/Self-stresses of concrete, MPa<br>$\sigma_{c,CE} = \sigma_s \cdot \rho_l$                                     | 0              | 0,53             | 0,74           | 0,84           |



Rys. 10. Zmierzone wielkości ekspansji nieswobodnej przy różnych stopniach zbrojenia próbki betonowej wykonanej z cementu ekspansywnego IMMB oraz wykres funkcji aproksymującej uzyskane wyniki ( $\epsilon_{cn,CE} = 0,23e^{-75\rho_l}$ ).

Fig. 10. Measured values of non-free expansion of samples with different reinforcement ratio, made of concrete based on IMMB expansive cement and the curve best fitted the results ( $\epsilon_{cn,CE} = 0,23e^{-75\rho_l}$ ).

was observed that, within the studied range of reinforcement ratios, it is better described by an exponential curve of the form than by formula [1]. By the least squares method the coefficient values for the concrete examined were determined:  $a = 0,23$ ,  $b = 75$ .

## 5. Final remarks

1. The knowledge of the binder free expansion values, usually given by the producer, is not sufficient for unequivocal prediction of the expansion parameters of the concrete made with that binder. The free expansion of concrete is even several times lower than that of the binder (in the case of author's research over 6 times). Its value heavily depends on the amount and features of the aggregate and the conditions of preparing the concrete (the curing procedure and the strength at the beginning of the expansion).
2. Research on reinforced elements of IMMB expansive concrete allowed the author to establish the relation of the rate of concrete non-free expansion and the ratio of its reinforcement. Within the studied range of reinforcement degrees, the relation can be described by an exponential function.