

CERCETAREA EXPERIMENTALĂ, COMPONENTĂ ESENȚIALĂ ÎN APLICAREA DIFERITELOR METODE DE STABILIRE A DURATEI DE SERVICIU A CONSTRUCȚIILOR DIN BETON

EXPERIMENTAL RESEARCH, ESSENTIAL COMPONENT IN THE APPLICATION OF DIFFERENT METHODS TO ESTABLISH THE SERVICE LIFE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES

DAN GEORGESCU¹, ADELINA APOSTU¹, RADU GAVRILESCU²

¹Universitatea Tehnică de Construcții București, B-dul Lacul Tei nr.124, Sector 2, București, România

²S.C. Carpatcement Holding S.A., Șos. București – Ploiești nr. 1A, București, România

Proiectarea duratei de serviciu a construcțiilor din beton armat poate fi efectuată utilizând metode de complexitate diferită (integral probabilistice, bazate pe coeficienți parțiali de proiectare sau pe baza asigurării unor compoziții adecvate). Indiferent de complexitate, rezultatele cercetărilor experimentale in-situ și în laborator trebuie să pună la dispoziție datele necesare unor astfel de abordări pentru diferite tipuri de mecanisme de degradare a betonului armat.

Articolul prezintă rezultatele unor cercetări experimentale efectuate pe betoane preparate cu cimentul tip CEM III/A Carpatcement, ca exemplu pentru obținerea datelor necesare stabilirii duratei de serviciu a construcțiilor realizate cu un anumit tip de ciment.

The design of the service life of reinforced concrete structures can be performed using design approaches with different levels of complexity (full probabilistic, based on partial factor or deemed to satisfy). No matter the complexity, the results of the experimental researches in-situ and in the laboratory must provide the necessary data for such approaches, for different types of degradation mechanism of reinforced concrete.

The article presents the results of experimental researches performed on concretes prepared with cement type CEM III/A Carpatcement, as an example for obtaining the necessary data in order to establish the service life of constructions performed with a certain type of cement.

Keywords: concrete, service life design, chlorides, carbonation

1. Introducere

Articolul își propune să identifice principalii parametri care trebuie determinați experimental pentru a se putea calcula durata de serviciu a construcțiilor din beton armat.

Există în ultima perioadă numeroase preocupări în stabilirea unor metode de proiectare [1] pentru evitarea deteriorărilor cauzate de acțiunea mediului, comparabile cu cele utilizate în eurocodurile structurale [2]. Această modalitate de proiectare necesită parcurgerea mai multor etape [1]:

- Cuantificarea mecanismelor de deteriorare.
- Definirea unor stări limită.
- Calcularea probabilității ca aceste stări limită să fie atinse.
- Definirea tipului de stare limită, SLS - stare limită de serviciu sau SLU – stare limită ultimă.

Proiectarea duratei de serviciu poate fi abordată utilizând două strategii:

1. Introduction

The article proposes to identify the main parameters which must be experimentally determined in order to calculate the service life of reinforced concrete structures.

Lately, there are many preoccupations to establish certain design methods [1] to avoid deteriorations caused by environmental actions, comparable with those used in the structural EUROCODES [2]. This design modality needs several stages [1]:

- The quantification of deterioration mechanisms.
- Defining certain limit states.
- Calculating the probability that these limit states occur.
- Defining the type of limit states, SLS – serviceability limit state or SLU –ultimate limit states.

The service life design can be approached using two strategies:

* Autor corespondent/Corresponding author,
Tel.: 0040 21 242 12 91, e-mail: danpaulgeorgescu@yahoo.com

Strategia 1: Proiectată să reziste deteriorărilor:

- De nivel 1 - integral probabilistică
- De nivel 2 – bazată pe coeficienți parțiali de proiectare, referitori la acțiuni sau materiale (semiprobabilistică)
- De nivel 3 – bazată pe principiul „consideră că satisface” (existentă în standardele actuale)

Strategia 2: Evitarea deteriorărilor

Indiferent de metoda utilizată în strategia 1, mecanismele de deteriorare trebuie cuantificate prin aplicarea unor modele care să fie validate prin experimente în laborator și observații practice in-situ.

O componentă esențială a acestui proces este determinarea influenței caracteristicilor materialelor asupra diferitelor procese de deteriorare, care se poate evidenția prin aplicarea unor metode experimentale desfășurate în condiții specifice.

Articolul prezintă rezultatele unor cercetări experimentale efectuate asupra unor betoane preparate cu CEM III/A produse de către Carpatcement Holding S.A.-Heidelberg Cement Group, date necesare pentru aplicarea metodelor de evaluare a duratei de serviciu a construcțiilor din beton realizate cu acest ciment [3].

S-a investigat cantitativ (pe baza programului de calcul) procesul de deteriorare a betonului, și anume: coroziunea indusă din carbonatare [4], din acțiunea clorurilor, atacul de îngheț-dezgheț, atacul sulfatic. Primele două mecanisme vor fi prezentate în prima parte a articolului.

Pentru fiecare din mecanismele de deteriorare se vor evidenția relațiile de calcul propuse în literatură, coeficienții care trebuie stabiliți pe cale experimentală, metodele necesar a fi aplicate.

2. Coroziunea indusă de carbonatare – beton nefisurat

În capitolul introductiv s-a indicat faptul că există trei nivele de proiectare a duratei de serviciu a construcțiilor din beton armat. În prezentul articol se vor prezenta formulele de calcul pentru abordările probabilistice și semiprobabilistice, cu evidențierea coeficienților care impun determinări experimentale [5]. Astfel, ecuația (1) descrie o stare limită în care acoperirea cu beton a armăturii este comparată cu adâncimea de carbonatare $X_c(t)$ într-un anumit punct la timpul t .

$$g(a, X_c(t)) = a - X_c(t) \quad (1)$$

$$X_c(t) = \sqrt{2K_e K_c (K_t R^{-1}_{ACC,0} + \varepsilon_t) C_s} \cdot \sqrt{t} W(t),$$

în care: a este grosimea stratului de beton, [mm]; $X_c(t)$ - adâncimea de carbonatare la timpul t , [mm]; t - timpul, [ani]; K_e - coeficient în funcție de mediu,

Strategy 1: Designed to resist deteriorations (this is introduced three levels of sophistication):

- Level 1 – full probabilistic design approach
- Level 2 – partial factor design approach, regarding actions or materials (semi-probabilistic)
- Level 3 – deemed to satisfy design approach (existing in the current standards)

Strategy 2: Avoidance of deteriorations

No matter the method used in strategy 1, the deterioration mechanisms must be quantified by applying certain models which must be validated by laboratory experiments and practical observations in-situ.

An essential component of this process is the determination of the influence of material characteristics over different deterioration processes, which can be evidenced by applying certain experimental methods developed in the specified conditions.

The article presents the results of certain experimental researches over some concretes prepared with CEM III/A developed by Carpatcement Holding S.A.-Heidelberg Cement Group, data necessary for applying the assessment methods for the service life design of concrete structures performed with this cement [3].

It was investigated quantitative (on calculation program) the deterioration process for concrete: carbonation induced corrosion [4], chloride induced corrosion, freeze/thaw attack, sulfatic attack. The first two mechanisms will be presented in the first part of the article.

For each deterioration mechanism, the calculation relations suggested by the literature will be evidenced, the coefficients which must be experimentally established, the methods necessary to be applied.

2. Carbonation induced corrosion by - uncracked concrete

In the introduction was mentioned the fact that there are three level for designing the service life of the reinforced concrete structures. In the present article the calculation formulas will be presented for the probabilistic and semi-probabilistic approaches, highlighting the coefficients implying experimental determinations[5]. Therefore, the equation (1) describes a limit states in which the concrete cover is compared with the carbonation depth $X_c(t)$ in a certain point of time t .

$$g(a, X_c(t)) = a - X_c(t) \quad (1)$$

$$X_c(t) = \sqrt{2K_e K_c (K_t R^{-1}_{ACC,0} + \varepsilon_t) C_s} \cdot \sqrt{t} W(t),$$

where:

a is concrete cover, [mm]; $X_c(t)$ - carbonation

influența umidității; K_c - coeficient în funcție de durata de tratare a betonului; K_t , ϵ_t - coeficienți care țin seama de diferențele dintre valorile adâncimii de carbonatare determinate în condiții accelerate și respectiv în mediu natural; $R^{-1}_{ACC,O}$ - valorile rezistenței la carbonatare a betonului la puterea -1, [(mm²/an)/kg/m³]; C_s - concentrația de CO₂, [kg/m³]; $W(t)$ - funcție care depinde de mediu.

Formula (1) indică atât principalii factori de care depinde carbonatarea betonului, cât și modalitățile de determinare a acestora.

Având în vedere obiectivul cercetărilor experimentale, în mod evident, de interes este cuantificarea rezistenței $R^{-1}_{ACC,O}$.

Există diverse propuneri privind efectuarea unor teste accelerate pentru determinarea rezistenței la carbonatare a betonului.

În literatura de specialitate [6] se indică o metodă prin care o probă de 100x100x150 mm, după menținere 7 zile în apă și 21 de zile într-un mediu controlat, cu $T_{ref} = 20^{\circ}C$ și $R_H = 65\%$, se introduce pentru încă 28 de zile într-o cameră având $T_{ref} = 20^{\circ}C$ și $R_H = 65\%$ și o concentrație de CO₂, $C_s = 2,0$ vol %.

După menținerea în acest mediu, proba este despăcată și se măsoară adâncimea de carbonatare.

După măsurarea adâncimii de carbonatare, se poate determina rezistența la carbonatare a betonului la puterea -1, utilizând relația (2):

$$R^{-1}_{ACC,O} = (X_c/\tau)^2 \quad (2)$$

în care: τ este o constantă de timp, [(s/kg/m³)^{0.5}], care, în cazul metodei descrise anterior, are valoarea $\tau=420$; X_c - grosimea stratului de beton carbonatat, [mm].

Există date în literatura de specialitate privind valorile lui $R^{-1}_{ACC,O}$, date prezentate în tabelul 1.

depth at the time t, [mm]; t - time, [years]; K_e - environmental function; K_c - execution transfer parameter; K_t - regression parameter; $R^{-1}_{ACC,O}$ - inverse effective carbonation resistance of concrete, [(mm²/an)/kg/m³]; ϵ_t - error term; C_s - CO₂ concentration, [kg/m³]; $W(t)$ - weather function.

Equation (1) indicates the main factors on which the concrete's carbonation is depending as well as the modalities to determine them.

Considering that the object of interest of the experimental researches is obviously the quantification of the resistance $R^{-1}_{ACC,O}$.

There are different suggestions regarding the performance of certain accelerated tests in order to determine the concrete's resistance to carbonation.

In the technical literature [6] there is indicated a method by which a sample of 100x100x150 mm, after being stored for 7 days in tap water and 21 days in a standardized laboratory climate, with $T_{ref} = 20^{\circ}C$ and $R_H = 65\%$, is introduced for another 28 days in a room with $T_{ref} = 20^{\circ}C$ and $R_H = 65\%$ and the CO₂ concentration of $C_s = 2,0$ vol %.

After removal the concrete specimens are split and the carbonation depth is measured.

After measuring the carbonation depth, the mean value of the reference inverse effective carbonation resistance is determined, using the relation (2):

$$R^{-1}_{ACC,O} = (X_c/\tau)^2 \quad (2)$$

where τ is time constant, in [s/kg/m³)^{0.5}], for the described condition, has the value $\tau=420$; X_c - measured carbonation depth in the compliance test, [mm].

In the specialty literature, there are data regarding the values of $R^{-1}_{ACC,O}$, data presented in Table 1.

Tabelul 1

Tip ciment Cement type	Cuantificarea lui $R^{-1}_{ACC,O}$ / Quantification of $R^{-1}_{ACC,O}$ Apă/Liant echivalent / W/C equivalent *					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I 42.5R	-	3.1	5.2	6.8	9.8	13.4
CEM I 42.5R + cenușă* (k=0,5) CEM I 42.5R + FA* (k=0,5)	-	0.3	1.9	2.4	6.5	8.3
CEM I 42.5R + praf silice* (k=2) CEM I 42.5R + SF* (k=2)	3.5	5.5	-	-	16.5	-
CEM III/B 42.5 R	-	8.3	16.9	26.6	44.3	80.0

*) raport Apă/Liant echivalent considerând 22% cenușă și 5% praf de silice / equivalent water cement ratio, considering FA (fly ash) or SF (silica fume) with the respective k-value (efficiency factor)

În cazul utilizării metodei semiprobabilistice se utilizează relația (3):

$$a_d - X_{c,d}(t_{SL}) \geq 0$$

In case of using factor method, the relation (3) is applied:

$$(3)$$

$$X_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2K_{ed}K_{cd}(K_{td}R^{-1}_{ACC,O,k}\gamma_R + \epsilon_{td})C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}W(t_{SL})}$$

În care: a_d este valoarea proiectată a adâncimii de carbonatare, [mm]; $X_{c,d}(t_{SL})$ - valoarea de proiectare a adâncimii de carbonatare la timpul t_{SL} ; $K_{e,d}$, $K_{c,d}$, $K_{t,d}$ - valori de proiectare ale coeficienților ale căror semnificații au fost prezentate pentru relația (1); γ_R - coeficient parțial de siguranță, $\gamma_R = 1.5$. Se poate observa că unul din parametrii esențiali care intervin, este rezistența betonului la carbonatare cuantificată prin valorile lui $R^{-1}_{ACC,O,k}$. În acest fel se pot determina valorile adâncimii de carbonatare în timp, în funcție de anumite condiții de expunere și compoziții de betoane. În mod evident, cercetarea experimentală este esențială în aplicarea acestei metode.

Valoarea lui $R^{-1}_{ACC,O}$ poate fi determinată conform metodei prezentate anterior, și/sau poate fi verificată/ determinată prin măsurarea adâncimii de carbonatare a betonului component al unor elemente expuse în medii reale.

where a_d is carbonation depth designed value, [mm]; $X_{c,d}(t_{SL})$ - design value of the carbonation depth at the time t_{SL} ; $K_{e,d}$, $K_{c,d}$, $K_{t,d}$ - design values of: environmental function, execution transfer parameter, regression parameter; γ_R - partial safety factor, $\gamma_R = 1.5$. You can observe that one of the essential parameters interfering, is the concrete's resistance to carbonation, quantified by the values of $R^{-1}_{ACC,O,k}$.

Therefore, the carbonation depth values can be determined in time, depending on certain exposure conditions and the concrete compositions. Obviously, the experimental research is essential in order to apply this method.

The value of $R^{-1}_{ACC,O}$ can be determined according to the method presented previously, and/or can be verified/determined by measuring the concrete's carbonation depth, component of certain elements exposed in the real environments.

Tabelul 2

Valorile adâncimii de carbonatare pentru betoanele menținute în mediu interior cu umiditate mare
The carbonation depth values for concretes stored inside with high humidity

Clasa betonului Concrete class	Dozaj ciment Cement dosage (kg/m ³)	Raport A/C W/C ratio	Adâncimea de carbonatare / Carbonation depth (mm)*					
			180 zile/ days	Medie average	1 an year	Medie average	2 ani years	Medie average
C16/20	325	0.47	0	0	2.0	1.83	3.0	3.00
			0		2.0		3.0	
			0		1.5		3.0	
C20/25	370	0.41	0	0	1.0	1.17	3.0	2.67
			0		1.0		3.0	
			0		1.5		2.0	
C25/30	420	0.37	0	0	1.0	1.17	3.0	3.00
			0		1.0		3.0	
			0		1.5		3.0	
C30/37	470	0.35	0	0	1.0	1.33	2.0	2.00
			0		2.0		2.0	
			0		1.0		2.0	

*) probele au fost menținute în interior, în camera de păstrare cu umiditate relativă a mediului ambiant ridicată, peste 70 %
the samples were stored inside, in the preservation room, with high humidity degree of the environment, over 70 %

Tabelul 3

Valorile adâncimii de carbonatare pentru betoanele menținute în mediu interior cu umiditate mică
The carbonation depth values for concretes stored inside, with low humidity

Clasa betonului Concrete class	Dozaj ciment Cement dosage (kg/m ³)	Raport A/C W/C ratio	Adâncimea de carbonatare / Carbonation depth (mm)*			
			1 an /year	medie average	2 ani/ years	medie average
C16/20	325	0.47	5	5.33	5	5.67
			5		6	
			6		6	
C20/25	370	0.41	6	5.67	6	6.00
			6		6	
			5		6	
C25/30	420	0.37	5	5.00	6	6.33
			5		7	
			5		6	
C30/37	470	0.35	5	5.00	6	6.00
			5		6	
			5		6	

*) probele au fost menținute în interior, în camera de păstrare cu umiditate relativă a mediului ambiant redusă, sub 50%.
the samples were stored inside, in the preservation room with low humidity degree of the environment, under 50%.

În tabelele 2 și 3 se prezintă rezultatele înregistrate la un an și respectiv la doi ani pentru compoziții de betoane preparate cu cimentul III/A de diferite clase de beton (rapoarte A/C), probe menținute în medii cu umiditate mai mare de 80% și respectiv sub 65%.

Se observă diferențe sensibile obținute între valorile adâncimii de carbonatare pentru cele două medii de expunere. În schimb, având în vedere rapoartele A/C foarte scăzute, valorile pentru aceleași medii de expunere nu diferă semnificativ.

S-au determinat, de asemenea, valorile pentru adâncimea de carbonatare pentru un stâlp menținut în mediul urban (tabelul 4). Stâlpul a avut o clasă de rezistență prescrisă C30/37, raport A/C=0,35. S-au efectuat măsurători nedistructive pentru determinarea rezistenței betonului din stâlp, obținându-se valori ale rezistenței de aproximativ 40 N/mm². În figura 1 se prezintă evoluția rezistențelor betonului, determinate nedistructiv.

În tabelul 5 se prezintă rezultatele obținute pentru un stâlp amplasat în mediul marin.

Așa cum indică și tabelul 1, chiar în cazul utilizării unor cimenturi cu adaosuri mari de zgură, dacă se utilizează rapoarte A/C reduse, adâncimea de carbonatare este relativ redusă.

Relația (3) poate fi utilizată pentru a se determina compoziția de beton necesară pentru a

In Tables 2 and 3, are presented the results registered after 1 year and respectively 2 years of certain concrete compositions, prepared with cement III/A having different concrete classes (W/C ratio), samples stored in environments with humidity higher than 80% and respectively under 65%.

Sensible differences are observed, obtained between the carbonation depth values for the two exposure environments. In exchange, considering the very low W/C ratio, the values for the same exposure environments are not significantly different.

Also, the carbonation depth values were determined for a column stored in the urban environment (Table 4). The column had a prescribed compressive strength class of C30/37, 0.35 W/C ratio. Nondestructive measures were performed in order to determine the compressive strength of the column's concrete, obtaining values of the strength of approx. 40 N/mm². In figure 1, the evolution of the concrete's strength is presented, being nondestructively determined.

In table 5, are presented the results obtained for a column located in marine environment. As indicated by Table 1, even in the case of using cements with high additions of slag, if low W/C ratio is used, the carbonation depth is relatively low.

Tabelul 4

Valorile adâncimii de carbonatare pentru betoane menținute în mediu exterior urban
The values of the carbonation depth for concretes stored in the exterior, urban environment

Clasa betonului Concrete class	Dozaj ciment Cement dosage (kg/m ³)	Adâncimea de carbonatare a betonului din stâlp (mm) Carbonation depth of the column's concrete			
		1 an/year	medie / average	2 ani / years	medie / average
C30/37	470	0	0	2	2.25
		0		2	
		0		2	
		0		3	

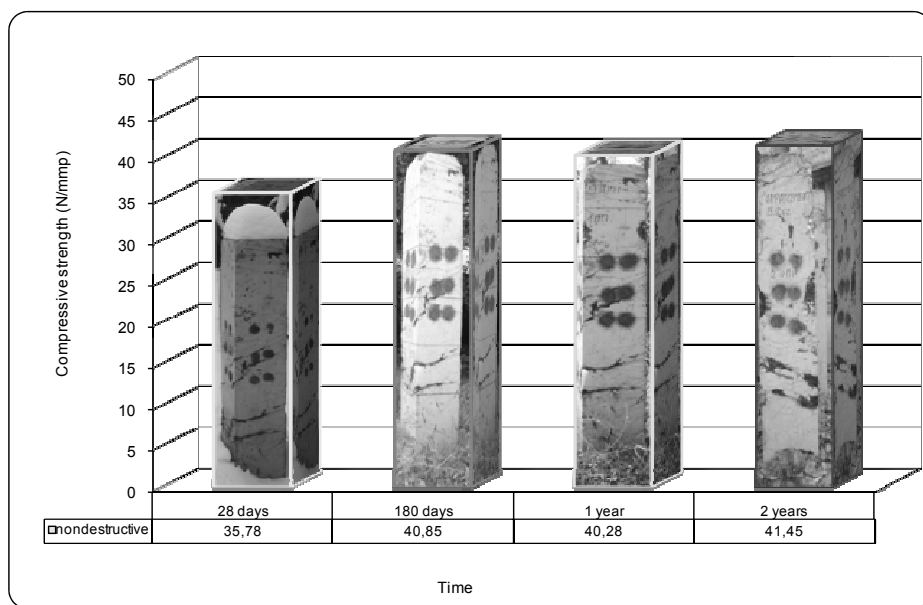








Fig. 1 - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului de clasa C30/37 / The evolution in time of the compressive strength for the column's concrete, strength class C30/37.

Tabelul 5

Valorile adâncimii de carbonatare pentru betoanele menținute în mediu exterior marin
 The carbonation depth values for concretes exposed in marine environment

Clasa beton Concrete class	Dozaj ciment Cement dosage (kg/m ³)	Raport A/C W/C ratio	Adâncimea la carbonatare (mm) determinată pe elementul experimental expus în mediu marin (XS1) la termenele / Carbonation depth (mm) for concrete exposed in marine environment (XS1) at:					
			6 luni 6 months	media average	9 luni months	media average	1 an 1 year	media average
C 30/37	510	0,33	0	2.39	3.24	4.20	4.0	5.63
			0		3.26		4.5	
			5.23*		5.80*		7.47*	
			4.34*		4.50*		6.56*	
								
								

* valorile adâncimii de carbonatare determinate pe fețele stâlpului cu orientarea spre mare / carbonation depth values determined at column faces from sea

se asigura aceleași durate de serviciu prin utilizarea unor cimenturi diferite.

De asemenea, această formulă poate fi utilizată pentru a se putea aprecia valoarea lui $R^{-1}_{ACC,0,k}$, în cazul în care se determină adâncimea de carbonatare pe un element amplasat într-un mediu real. De exemplu, pentru stâlpul amplasat în mediul urban din București, a fost măsurată adâncimea de carbonatare, la vârsta de doi ani, aceasta fiind de 2,25 mm.

Rescriem formula (3):

$$X_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2K_{ed}K_{cd}(K_{td}R^{-1}_{ACC,0,k}\gamma_R + \epsilon_{td})c_{s,d}} \sqrt{t_{SL}W(t_{SL})} \quad (3)$$

și considerăm / and consider:

$$K_{ed} = \left[\frac{1 - \left(\frac{R_{Hreal,k}}{\gamma_{RH}100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{R_{Href}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

în care: $R_{H,real,k}$ este valoarea medie a umidității stratului carbonatat; $R_{H,ref}$ - umiditatea de referință, 65%; $f_e = 5,0$; $g_e = 2,5$; γ_{RH} - coeficient parțial de siguranță pentru umiditatea relativă, $\gamma_{RH} = 1,3$; K_{cd} - coeficient care depinde de perioada de tratare, având valoarea de 1,61 pentru o perioadă de tratare de 3 zile; K_{td} - valoarea de proiectare a parametrului de regresie, în acest caz reprezintă valoarea medie $K_{td}=1,25$; $R^{-1}_{ACC,0,k}$ = valoarea caracteristică a rezistenței betonului la carbonatare

Equation (3) can be used to determine the necessary concrete composition to provide the same service life by using different cements.

Also, this formula can be used in order to appreciate the value of $R^{-1}_{ACC,0,k}$, in case the carbonation depth is determined on an element located in a real environment. For example, for the columns located in the urban environment in Bucharest, the carbonation depth was measured after 2 years, this being 2.25 mm.

We rewrite the equation (3):

where: $R_{H,real,k}$ is average value o relative humidity o the carbonated layer [%], here mean value $R_{H,ref}$ - reference relative humidity, 65%; $f_e = 5,0$; $g_e = 2,5$; γ_{RH} - partial safety factor for the relative humidity, $\gamma_{RH} = 1,3$; K_{cd} = design value of the execution transfer parameter, here mean value, $K_{cd} = 1.61$ for a curing period of 3 days; K_{td} = design value of the regression parameter, here mean value, $K_{td} = 1.25$; $R^{-1}_{ACC,0,k}$ - characteristic value of the inverse effective carbonation resistance o concrete,

la puterea -1; γ_R - coeficient parțial de siguranță, $\gamma_R = 1,5$; ε_{td} - valoarea de proiectare a coeficientului de „eroare”, $\varepsilon_{td} = 315,5$; c_{sd} - valoarea de proiectare a concentrației de CO_2 , $c_{sd} = 0,00082$; $W(t)$ - coeficient care ține de condițiile

meteo, $W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(P_{SR}T_{OW})^{b_{w,d}}}{2}}$; t_0 - timpul de referință, ani; $t_0 = 0,0767$ ani, T_{OW} - perioada cu umiditate, $T_{OW} = (\text{zile cu ploaie} \geq 2,5 \text{ mm per an}) / 365$; P_{SR} - parametru care depinde de direcția vântului în perioadele ploioase; $P_{SR}=1$ pentru elemente orizontale exterioare, $P_{SR}=0$ pentru elemente situate la interior; $b_{w,d}$ - valoarea de proiectare a exponentului de regresie, $b_{w,d}=0,446$.

Înlocuind valorile de mai sus și cunoscând valoarea lui $X_{c,d}(t_{SL})$ la doi ani și anume 2,25 mm, rezultă valoarea lui $R^{-1}_{ACC,O} 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s) (kg/m}^3\text{)}$ de aproximativ 2,6. Menționăm că această valoare determinată experimental corespunde unui ciment de tip III/A, la un raport A/C mai mic de 0,35. În mod evident, această modalitate de determinare necesită verificări la mai multe intervale de timp și cunoașterea în detaliu a condițiilor de mediu. Astfel, pot fi estimate valorile rezistenței la carbonatare a betonului pentru diferite tipuri de cimenturi, la diferite rapoarte A/C.

2. Coroziunea indusă de cloruri

O abordare integral probabilistică este dată, pentru acest fenomen, de relația (4):

$$C_{crit} = C(x=a, t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,c}t}} \right] \quad (4)$$

în care: C_{crit} - este conținutul critic de cloruri; $C(x, t)$ - conținutul de cloruri în beton la o adâncime x de suprafața betonului la timpul t ; C_0 - conținutul inițial de cloruri al betonului; $C_{s,\Delta x}$ - conținutul de cloruri la o adâncime Δx la un timp t ; x - adâncimea corespunzătoare unui anumit conținut de cloruri, [mm]; a - acoperirea cu beton a armăturilor, [mm]; Δx - adâncimea zonei de convecție (stratul de beton până la care procesul de penetrare a clorurilor diferă de legea a doua a lui Fick); $D_{app,c}$ - coeficientul aparent de difuzie a clorurilor prin beton, [mm^2/an]; t - timp, [ani]; erf - eroare de funcție.

Modelul se bazează pe legea a doua a lui Fick, având în vedere că s-a observat că transportul clorurilor în beton este controlat de fenomenul de difuzie [7]. În zona suprafeței supuse la umezire/uscarea (zona de convecție), mecanismele de transport nu mai sunt controlate de fenomenul de difuzie. Ca și în cazul carbonatării, și în acest caz este necesară cuantificarea tuturor parametrilor care intervin în formula (4). De interes pentru acest articol este cuantificarea coeficientului aparent de difuzie (tabelul 6) care intră în relația (5) de determinare a

[(mm^2/an)/ kg/m^3]; γ_R - partial safety factor, $\gamma_R = 1.5$; ε_{td} - design value of the error term, $\varepsilon_{td} = 315.5$; c_{sd} - design value of the concentration of CO_2 , $c_{sd} = 0.00082$; $W(t)$ - weather function depending on

the weather, $W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(P_{SR}T_{OW})^{b_{w,d}}}{2}}$; t_0 - time of reference, [years], $t_0 = 0.0767$ years; T_{OW} - time of wetness, $T_{OW} = (\text{days with rainfall } h_{nd} \geq 2.5 \text{ mm per year}) / 365$; P_{SR} - probability of driving rain, $P_{SR}=1$ for the horizontal exterior elements, $P_{SR}=0$ for the elements located inside; $b_{w,d}$ - design value of the exponent of regression exponent, here mean value, $b_{w,d}=0.446$.

Replacing the above values and acknowledging the value of $X_{c,d}(t_{SL})$ after two years, namely 2.25 mm, results the value of $R^{-1}_{ACC,O} 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s) (kg/m}^3\text{)}$ of approx. 2.6. We mention that this value, experimentally determined, corresponds to a cement type III/A, for a W/C ratio smaller than 0.35. Obviously, this determination modality needs verifications on several time intervals and detailed knowledge of the environmental conditions. Therefore, the values of the concrete's carbonation resistance can be estimated for different types of cements, on different W/C ratio.

2. Chlorides induced corrosion

A full probabilistic approach is given for this phenomena, by the Equation (4):

where C_{crit} is critical chlorides content, [wt.-%]; $C(x, t)$ - content of chlorides in concrete at depth X (structure surface $X=0$ m) and at time t , [wt.-%]; C_0 - the initial concrete chlorides content, [wt.-%]; $C_{s,\Delta x}$ - chlorides content at Δx depth, and a certain point of time t ; X - the depth corresponding to a certain chlorides content, [mm]; a - concrete cover, [mm]; Δx - depth of the convection zone (concrete layer up to which the process of chlorides' penetration differs from Fick's 2nd law of diffusion), [mm]; $D_{app,c}$ - apparent coefficient of chlorides diffusion through concrete, [mm^2/year]; t - time, [years]; erf - error function.

The model is based on Fick's second law, considering that it has been noticed that the chlorides' transportation in the concrete is controlled by diffusion [7]. In the area submitted to humidification /dryness (convection area) the transport mechanisms are no longer controlled by diffusion. As in the case of carbonation, in this case also is necessary the quantification of all parameters [5] interfering in the formula (4). In this article, it is very interesting the quantification of the chloride migration coefficient (Table 6) in

coeficientului $D_{app,c}$.

$$D_{app,c} = K_c D_{RMC,0} K_t A(t) \quad (5)$$

în care: K_c este o variabilă de transfer privind mediul; $D_{RMC,0}$ - coeficient de difuzie a clorului; K_t - parametru de transfer; $A(t)$ - subfuncție considerând „îmbătrânirea”.

Rezistența la penetrare a clorurilor depinde, în mod evident, de tipul de ciment, fapt evident și din tabelul 6 în care se poate observa avantajul utilizării cimenturilor cu adaos de zgură. Acest aspect a fost confirmat de cercetările experimentale efectuate de autori prin determinarea penetrării accelerate a clorurilor pentru betoane preparate cu trei tipuri de cimente [8].

determination relation (5) of the coefficient $D_{app,c}$.

$$D_{app,c} = K_c D_{RMC,0} K_t A(t) \quad (5)$$

where K_c is environmental transfer variable; $D_{RMC,0}$ - chloride migration coefficient, $[mm^2/a]$; K_t - transfer parameter; $A(t)$ - subfunction considering “aging”

The chlorides’ resistance to penetration obviously depends on the type of cement, which is also shown in table 6 where you can observe the advantage of using cements with slag additions. This aspect was also confirmed by the experimental researches performed by the authors by determining the accelerated penetration of chlorides for concretes prepared with three types of cement [8].

Tabelul 6

Valorile coeficientului $D_{RMC,0}$ pentru diferite amestecuri de betoane / Quantification of $D_{RMC,0}$ for different concrete mixtures

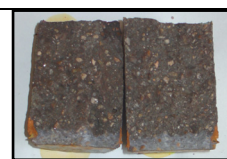
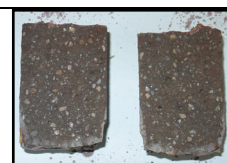
Tip ciment Cement type	$D_{RMC,0} [m^2/s]$					
	A/C echivalent / W/C equivalent *					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I 42,5R	-	8.9	10.0	15.8	19.7	25
CEM I 42,5R + cenușă/ash* (k=0,5)	-	5.6	6.9	9.0	10.9	14.9
CEM I 42,5R + praf silice/silica powder* (k=2)	4.4	4.8	-	-	5.3	-
CEM III/B 42,5 R	-	1.4	1.9	2.8	3.0	3.4

*) raport A/C echivalent considerând 22% pentru cenușă și 5% pentru praf de silice / equivalent water cement ratio, hereby considering FA (fly ash) or SF (silica fume) with the respective k-value (efficiency factor).

Tabelul 7

Valorile adâncimii de penetrare a ionilor de clor / The penetration depth values of the chlorine ions

Epruvetă Specimen	Tip ciment Cement type	Lungime epruvetă Specimen length (mm)	Diametru epruvetă Specimen diameter (mm)	Adâncimea de penetrare a ionilor de clor (mm) Penetration depth values of the chlorine ions (mm)	Adâncimea în care nu au pătruns ionii de clor (mm) Without penetration depth values of the chlorine ions (mm)	Adâncimea de penetrare a ionilor de clor Penetration depth values of the chlorine ions (mm)
				valori medii/ epruvetă average/ specimen	valori medii average	
1	III/ A 32.5 R	71	50	3 3	68 68	4.0
2		71	50	4 3	67 68	
3		71	50	5 6	65 64	
1	II/A-S 42.5R	71	50	7 7	64 64	7.2
2		75	50	6 7	69 68	
3		72	50	8 8	64 64	
1	SR I 32.5	73	50	9 9	64 64	8.7
2		73	50	8 8	65 65	
3		73	50	9 9	64 64	



Rezultatele sunt prezentate în tabelul 7. Se observă că adâncimea cea mai redusă de pătrundere a ionilor de clor s-a înregistrat în cazul betonului preparat cu CEM III/A.

Și în acest caz, în completare la metodologia propusă, sunt necesare încercări care să evidențieze cele mai indicate materiale componente compatibile cu aplicarea relațiilor ce indică durata de serviciu a construcțiilor.

4. Concluzii

4.1 Rezultatele studiilor și cercetărilor experimentale prezentate în acest articol au scos în evidență că aplicarea unor metode de proiectare pentru evitarea deteriorărilor cauzate de acțiunea mediului, comparabile cu cele utilizate în eurocodurile structurale, și de stabilire, în acest fel, a duratei de serviciu a structurilor din beton, nu se poate face decât având la bază suportul rezultatelor cercetării experimentale.

S-au detaliat relațiile care stau la baza stabilirii duratei de serviciu a construcțiilor din beton armat supuse acțiunilor de carbonatare și respectiv a clorurilor și rezultatele unor cercetări experimentale desfășurate de autori, evidențiindu-se legătura între aceste abordări.

4.2 În articol se propun abordări originale de utilizare a relațiilor de stabilire a duratei de viață a structurilor din beton armat supuse carbonatării, prin determinarea periodică a valorilor adâncimii de carbonatare pe elemente experimentale supuse acțiunii unor medii reale. Cunoscând valoarea adâncimii de carbonatare la anumite perioade de timp, compoziția betonului, și în detaliu acțiunea mediului, prin aplicarea relațiilor de stabilire a duratei de serviciu a construcțiilor, rezultă valoarea rezistenței la carbonatare a betonului, și astfel pot fi estimate valorile acestei rezistențe pentru diferite tipuri de cimenturi, la diferite rapoarte A/C. De asemenea, se pot determina factorii compoziționali ai betonului necesari asigurării aceleiași durate de serviciu a construcțiilor din beton armat, indiferent de tipul de ciment utilizat.

4.3 Studiile și cercetările experimentale au indicat că valoarea rezistenței la carbonatare a betonului preparat cu cimentul III/A, este dependentă de valoarea raportului A/C, iar betonul care are în componență acest ciment poate asigura o durată de serviciu corespunzătoare a construcțiilor.

4.4 Relația de stabilire a duratei de serviciu a construcțiilor din beton armat în medii clorurate, precum și rezultatele cercetărilor experimentale au scos în evidență avantajele utilizării cimenturilor de tip III/A în betoane supuse unor astfel de acțiuni.

The results are presented in Table 7. It is observed that the lowest penetration depth of the chlorine ions was registered in the case of concrete prepared with CEM III/ A.

Also in this case, in addition to the suggested methodology, tests are necessary in order to evidence the best necessary materials to apply the relations indicating the service life design.

4. Conclusions

4.1 The results of the studies and experimental researches presented in this article evidenced that the application of certain service life design methods to avoid the deteriorations caused by environmental actions, compared to those used in structural Eurocodes, and therefore to establish the service life of the concrete structures, cannot be performed unless based on the results from the experimental research.

There are details regarding the relations representing the basis for establishing the service life of the reinforced concrete structures, submitted to carbonation actions and respectively chlorides and the results of certain experimental researches developed by the authors, evidencing the connection between these approaches.

4.2 In the article, original approaches are suggested for the use of relations in order to establish the service life of reinforced concrete structures undergoing carbonation by frequently determining the carbonation depth values on the experimental elements with actions of the real environments. Knowing the carbonation depth value at certain periods of time, the concrete's composition and the detailed action of the environment, by applying the relations to establish the service duration of the construction, results the concrete's resistance value to carbonation, and therefore the resistance's values can be determined for different types of cement, in different W/C ratio. Also, the composition of the concrete can be determined, necessary in order to provide the same service life of reinforced concrete structure, no matter the cement type used.

4.3 The studies and experimental researches indicated that the value of the carbonation resistance of concrete prepared with cement III/A, depends on the value of the w/c ratio, and the concrete comprising this cement can provide a proper service life for the concrete structures.

4.4 The relation to establish the service life of reinforced concrete structures considering the chlorides' action as well as the results of the experimental researches evidenced the advantages of using the cement type III/A for concretes submitted to such actions.

