

CZU 699.87

*Croitoru Gh., Pruteanu N., Uzun N.*

## **CERCETAREA STRUCTURII BETONULUI ȘI INFLUENȚEI EI ASUPRA REZISTENȚEI LA COROZIUNE A ARMĂTURII**

### **Abstract**

*The paper presents a study of the processes of reinforcement corrosion in concrete structures as a consequence of aggressive infiltration of water through cracks in the concrete. The rate of corrosion of reinforcement in concrete depends on the density and moisture content of concrete. Determine the influence of relative air humidity (60%, 80%, 95%) on the rate of corrosion of steel in the crack was made in chambers termohidrostatice at 50 °C, at high concentrations of oxygen and carbon dioxide than the environment. Duration of tests, depending on the degree of aggressiveness of the medium ranged from several days to several months. During the tests, controlled temperature, relative humidity, gas concentration, humidity of the concrete and the environment. When humidity variation from 35 to 60 %, the resistance of concrete increases slightly. The relative humidity increased to 80 % and more, the ohmic resistance decreases and the corrosion of reinforcement may have an intensive development.*

### **Rezumat**

*În articol se prezintă un studiu privind procesele de coroziune a armăturilor din betonul construcțiilor ca urmare a infiltrării apelor agresive prin fisurile din beton. Viteza de coroziune a armăturii în beton depinde de densitatea și de starea de umiditate a lui. Determinarea influenței umidității relative a aerului (60 %, 80 %, 95 %) asupra vitezei de coroziune a oțelului, în zona fisurilor, s-a realizat în camere termohidrostatice la temperatura de 50 °C, la o concentrație mai mare a oxigenului și a dioxidului de carbon, decât în atmosferă. Durata verificărilor, în funcție de gradul agresivității mediului, a constituit de la câteva zile până la câteva luni. În timpul verificărilor s-au controlat temperatura, umiditatea relativă a aerului, concentrația gazelor, umiditatea betonului și a mediului ambiant. La variația umidității de la 35 până la 60 %, rezistența betonului crește puțin. La creșterea umidității relative până la 80 % și mai mult, rezistența ohmică scade, iar coroziunea armăturii poate avea o dezvoltare intensiva.*

### **Резюме**

*В статье представлено исследование процессов коррозии арматур в бетоне конструкций вследствие инфильтрации агрессивных вод через трещины в бетоне. Скорость коррозии арматуры в бетоне зависит от плотности и влажности бетона.*

*Определение влияния относительной влажности воздуха (60 %, 80 %, 95 %) на скорость коррозии арматуры, в зоне трещин, проводилось в термогидростатических камерах, при температуре 50 °С, при повышенной концентрации кислорода и углекислоты, чем в окружающей среде. Продолжительность испытаний, в зависимости от степени агрессивности среды, составило от нескольких дней до нескольких месяцев. Во время испытаний контролировались температура, относительная влажность воздуха, концентрация газов, влажность бетона и окружающей среды. При вариации влажности от 35 до 60 %, сопротивление бетона возрастает незначительно. При возрастании относительной влажности до 80 % и больше, омическое сопротивление падает, а коррозия арматуры может иметь интенсивное развитие.*

## **Introducere**

Betonul este un material compozit tip conglomerat obținut prin întărirea unui amestec bine omogenizat de ciment, agregat, apă și eventual adaos și aditivi.

Betonul armat fiind un material care utilizează rezistența la compresie a betonului și rezistența la întindere a oțelului, are caracteristici diferite de ale celor două materiale componente [1].

Asocierea betonului și armăturii este posibilă datorită faptului că, aceste două materiale au valori apropiate ale coeficienților de dilatare termică, au caracteristici de deformație care sunt compatibile, asigurând aderența dintre ele, totodată betonul asigură protejarea armăturii contra coroziunii [2].

Menținerea îndelungată a armăturii, la acțiunea mediului corosiv asupra construcției din beton armat, este determinată de procesele neutralizării a betonului sau acumulării în el a ionilor - stimulatori de coroziune a oțelului.

Este cunoscut [3], că în construcțiile de grosimi mici, la densitatea insuficientă a betonului, spălarea calciului de apa infiltrată duce la coroziunea considerabilă a betonului (tipul I de coroziune) [4], iar starea armăturii nu determină durabilitatea construcției în întregime.

La infiltrarea prin beton a apelor acide (tipul II de coroziune) are loc dizolvarea nesemnificativă a calciului din beton.

Apele mineralizate provoacă coroziunea betonului de tipul III, însă dacă apa conține mulți ioni de clor, atunci pătrunderea lor spre suprafața oțelului poate provoca coroziunea lui mai repede decât va fi distrus betonul din stratul de protecție.

## **Rezultate experimentale. Interpretări.**

Pentru cercetări s-au folosit probe din beton armat sub formă de grinzi ( $10 \times 10 \times 100$  cm) armate în partea de jos cu două bare din oțel beton A400 și A500 de diametrul  $\varnothing 10$  mm și  $\varnothing 12$  mm și lungimea de 980 mm.

Determinarea influenței umidității relative a aerului (60 %, 80 %, 95 %) asupra vitezei de coroziune a oțelului, în zona fisurilor, s-a realizat în camere termohidrostatice la temperatura de 50 °C, la o concentrație mai mare a oxigenului și a dioxidului de carbon, decât în atmosferă.

Alegerea regimurilor verificărilor corosive rapide s-a făcut cu evidența mecanismului proceselor, care decurg pe suprafața armăturii în condiții naturale.

Durata verificărilor, în funcție de gradul agresivității mediului, a constituit de la câteva zile până la câteva luni. În timpul verificărilor s-au controlat temperatura, umiditatea relativă a aerului, concentrația gazelor, umiditatea betonului și a mediului ambiant.

Este cunoscut, că la coroziunea atmosferică a metalelor, viteza procesului în mare măsură este determinată de umiditatea aerului [5]. Însă aerul umed curat are o influență slabă asupra suprafeței oțelului. Coroziunea lui crește liniar la mărirea umidității relative a aerului, rămânând în general neînsemnată.

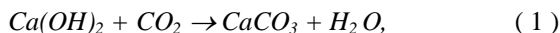
Viteza de coroziune a armăturii în beton depinde de densitatea și de starea de umiditate a lui. V.M. Moskvin arată [6], că în betonul compact armătura practic nu se corodează la umiditatea relativă a aerului mai mică de 60 %; dezvoltarea maximă a coroziunii are loc la umiditatea de 80 %. Odată cu creșterea umidității aerului până la 95% și mai mult, procesul de coroziune scade puțin.

Cum au arătat experiențele, coroziunea avansată a oțelului s-a observat în rezultatul penetrării în beton a sărurilor care nimeresc pe suprafața lui sub formă de aerosoluri, împreună cu umiditatea atmosferică absorbită.

Repetarea periodică a ciclurilor de umectare și uscare injectează prin pori și capilare sarea în adâncimea betonului spre armatură.

Acțiunii mediului ambiant (umed și gazos) sunt expuse majoritatea construcțiilor. La aceasta, în elementele de închidere, este posibilă infiltrarea aerului, care accelerează carbonatarea betonului.

Procesul de carbonatare constă în aceea, că dioxidul de carbon din aer pătrunzând în porii și capilarii betonului, se dizolvă în lichidul poros și reacționează cu  $\text{Ca(OH)}_2$ :



Cum arată cercetările, cinetica carbonatării a carbonului este descrisă reușit de ecuația [7]:

$$x = \sqrt{\frac{2D'C_0}{m_0} \cdot t} \quad (2)$$

unde  $t$  - timpul;  $D'$  - coeficientul efectiv al difuziei dioxidului de carbon în stratul carbonatat al betonului, care depinde de structura mediului poros și umiditatea betonului;  $C_0$  - concentrația dioxidului de carbon în atmosferă;  $m_0$  - cantitatea dioxidului de carbon, absorbit de o unitate de volum al betonului la carbonatarea deplină.

Pentru prognozarea menținerii îndelungate a stării de pasivare a betonului față de oțel ne putem folosi de relația de mai jos, care rezultă din ecuația de mai sus:

$$x_1 = x_2 \sqrt{\frac{C_1 t_1}{C_2 t_2}}, \quad (3)$$

unde  $x_1$  și  $x_2$  - adâncimea carbonatării în termenii corespunzători  $t_1$  și  $t_2$ , la concentrația  $\text{CO}_2$  corespunzător  $C_1$  și  $C_2$ .

Conform experiențelor, procesul de carbonatare atinge și pereții fisurilor și zona contactului deteriorat al betonului cu armătura. Distanța, la care se răspândește carbonatarea în lateral de la fisură, ca de regulă este proporțională mărimii deschiderii ei.

Fisura din beton, ce atinge suprafața armăturii, ușurează pătrunderea substanțelor agresive, înlesnește deteriorarea locală a pasivității oțelului.

În urma cercetărilor, s-a stabilit, că starea electrochimică a suprafeței de metal în betonul compact, în stare gazo – lichidă, se caracterizează prin potențial negativ 50 - 100 mV și prin polarizare anodică considerabilă. Pasivarea armăturii, de obicei, se sfârșește peste 10 - 12 ore după ce a fost introdusă în beton (fig. 1), în acest timp se pasivează nu numai suprafața curată, dar și sectoarele cu procent mic de rugină. Creșterea curbelor în primele 4 - 6 ore se explică prin dizolvarea oxizilor și produșilor de coroziune, după ce se formează noi straturi chimice de absorbție.

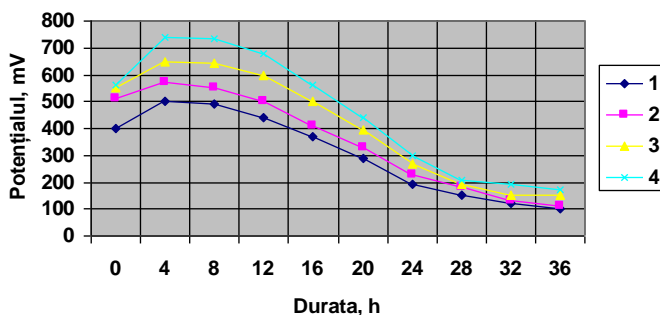


Fig.1 Influența stării de suprafață asupra vitezei de pasivare a oțelului: 1- oțel curățat și menținut la aer; 2- oțel menținut în mediu agresiv (vapori HCl 3 și 7 zile); 3- oțel menținut în mediu agresiv (vapori Br<sub>2</sub> 3 zile); 4- oțel menținut în mediu agresiv (vapori Br<sub>2</sub> 7 zile).

În fig. 2 sunt prezentate curbele de variație ale potențialului de oțel în beton, care arată că la mărirea fisurilor de 0,2 mm și mai mult, s-a observat o micșorare bruscă a potențialului după o lună, la 0,1 mm - după două luni, iar la 0,05 mm - după trei luni.

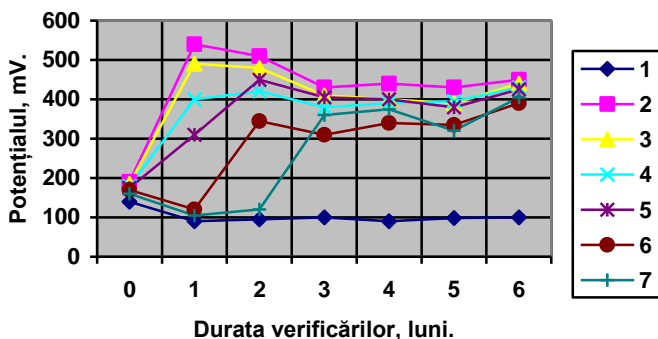
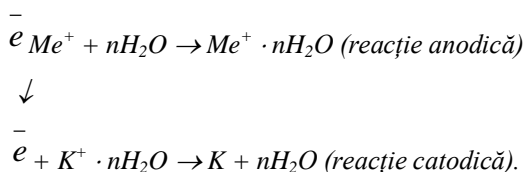


Fig. 2 Variația potențialelor ale oțelului în beton la umectarea periodică:  
 1 - fără fisuri; 2 - 7 - mărimea fisurilor corespunzător: 0,7; 0,5; 0,4; 0,2; 0,1; 0,05 mm.

Activitatea locală a suprafeței oțelului, în zona intersecției lui cu fisura, provoacă coroziunea locală a lui. De aceea, la prezența fisurilor în beton, rezistența lui va depinde de particularitățile mecanismului și cineticii procesului de coroziune în diferite condiții de interacțiune a construcției cu mediul.

Dizolvarea electrochimică a metalelor în procesul de coroziune, de obicei, este prezentată sub forma a două reacții conjugate [7]; anodică - care constă în trecerea ion - atomilor ai metalului din rețeaua cristalină în soluție, însoțită de eliberarea electronilor și catodică - care constă în asimilarea acestor electroni:



Limitării de viteză, a unei sau altei reacții, servesc fenomenele de polarizare, care sunt însoțite de deplasarea potențialului de electrod spre partea de micșorare a diferenței de potențial al perechii. Polarizarea poate fi inițiată de desfășurarea lentă a reacțiilor de electrod (polarizarea

electrochimică) sau înlăturarea produșilor reacției de la electrod (polarizarea concentrată).

De obicei, particulele, ce asimilează electronii (adică depolarizarea), sunt moleculele de oxigen și ionii de hidrogen, ce se află în apă. Ca depolarizatori pot servi: gazul sulfuric, clorul atomic, orice cationi metalici, care există în câteva etape de oxidare (ionii de fier, crom), și de asemenea, anionii neorganici ce conțin acizi ( $\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{MnO}_4$ ).

Betonul poate avea densitatea și umiditatea diferite, de care depind astfel de caracteristici, ca rezistența ohmică, pătrunderea difuzională, etc. Variația mediului la suprafața armăturii este limitată. Ea poate fi realizată pe contul difuziei lichidului și gazelor în capilarele și porii betonului. Compoziția electrolitului în corpul poros al betonului va depinde de tipul și compoziția chimică a materialelor inițiale și poate varia în timp sub influența mediului ambiant.

În electroliții neutri și bazici, procesul catodic are loc cu depolarizarea de oxigen și include deplasarea oxigenului spre catod cu ionizarea lui la suprafața oțelului:



Oxigenul ajunge la suprafața catodică trecând prin interfața aer-electrolit (dizolvare), difuzează prin stratul principal al lichidului și stratul subțire al electrolitului, adiacent catodului.

Dependența potențialului electrozilor -  $E$  de timp, la polarizarea cu intensitate constantă a curentului se exprimă prin relația [8]:

$$-E = 2,3 \frac{2RT}{nF} \lg (\tau_c - \tau) - A, \quad (5)$$

unde  $\tau$  - durata de polarizare a catodului;  $\tau_c$  - durata polarizării catodului până la consumarea totală a oxigenului în celulă;  $A$  - constanta, care include echivalentul de oxidare al fierului;  $R$  - constanta gazului;  $T$  -

temperatura absolută;  $F$  - constanta lui Faraday;  $n$  - numărul de electroni, asimilați de o moleculă de oxigen.

$$\frac{2RT}{nF}$$

Din ecuație rezultă ca relația (5) la  $\lg(\tau_c - \tau)$  este  $\text{tg } \alpha = 2,3 \frac{nF}{2RT}$ . Valoarea teoretică  $\text{tg } \alpha = 0,12$ , iar conform datelor obținute  $\text{tg } \alpha = 0,25$ . Această necoincidență a mărimilor teoretice și experimentale  $\text{tg } \alpha$  se poate explica prin valoarea considerabilă a pH-ului, și de asemenea, prin dificultatea ajungerii oxigenului din beton la catod. De aceea, se poate presupune că în acest caz mecanismul de ionizare al oxigenului nu se deosebește de mecanismul reducerii oxigenului în electroliți simpli și soluri, subordonându-se relației cunoscute [8]:

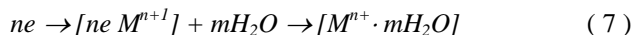
$$i = K [C_1] e^{-\frac{nFE}{2TR}} \quad (6)$$

unde  $i$  - densitatea curentului catodic;  $C_1$  - concentrația oxigenului pe suprafața catodului.

Însă, procesul catodic cu depolarizarea de oxigen, al oțelului în beton decurge cu frânarea difuziei oxigenului în stratul de protecție din beton.

La regimurile nestaționare (umezirea periodică a betonului, încălzirea și răcirea lui), infiltrația aerului, modificarea presiunii barometrice etc., absorbția oxigenului poate să se intensifice.

Despre mecanismul anodic de dizolvare al metalelor încă nu există o părere unică. Cercetările multor autori [9, 10], presupun că în procesul dizolvării anodice a fierului cea mai lentă este ionizarea metalului:



Conform altei teorii [8], polarizarea se explică prin procesul lent de formare al ionilor hidratați, ce apar la dizolvarea anodică a metalelor. În anumite cazuri, faza lentă a procesului anodic poate fi difuzia ionilor, care provoacă polarizarea concentrată.



Comparând ecuațiile polarizării concentrate a anodului și catodului:

$$\Delta\varphi_a = \frac{RT}{nF} \ln \frac{i_D + i}{i_D}; \quad \text{la } i = i_D \quad \Delta\varphi_a = \frac{RT}{nF} \ln 2; \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_c = \frac{RT}{nF} \ln \frac{i_D + i}{i_D}; \quad \text{la } i \rightarrow i_D \quad \varphi_c \rightarrow \infty \quad (9)$$

(unde  $i$  - densitatea curentului;  $i_D$  - densitatea curentului de difuzie), se poate observa că una și aceeași densitate a curentului provoacă o polarizare concentrată mai mare a catodului decât a anodului.

În beton, condițiile de desfășurare a proceselor anodice se deosebesc considerabil de condițiile desfășurării lor în electrolit și starea electrochimică a suprafeței oțelului nu depinde de compoziția și structura betonului.

Deoarece coroziunea electrochimică este rezultatul desfășurării concomitente a mai multor procese elementare, decurgerea unuia din ele este mai dificilă în comparație cu altele. Fiindcă aceste procese sunt conjugate, adică reciproc dependente, se stabilește viteza desfășurării comune pentru toate procesele, determinată de decurgerea lentă a unui proces. Acest proces se numește limitat.

În funcție de faptul, care fază este mai lentă, se poate deosebi cinetica electrochimică sau difuzională a procesului de electrod. Măsura de frânare a acestei reacții de electrod este tangenta unghiului între curba

trasată în punctul dat și axa absciselor,  $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta\varphi}{\Delta i}$ , care este numită polarizarea electrodului. La  $\text{tg } \alpha \rightarrow \infty$  procesul de electrod decurge cu o

frânare puternică, iar la  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta i} \rightarrow 0$  - aproape liber.

Mărimea curentului de coroziune, în general, se determină ori de viteza desfășurării procesului de electrod (controlul de catod), ori de viteza

desfășurării procesului anodic (controlul de anod), ori de rezistența ohmică a sistemului.

Partea relativă de control al procesului de coroziune prin polarizare se determină, de obicei, din diagrame (fig. 3), unde:

- partea controlului anodic 
$$\frac{I' \operatorname{tg} \beta}{\varphi_c^0 - \varphi_a^0} = \frac{AD}{AB};$$

- partea controlului catodic 
$$\frac{I' \operatorname{tg} \alpha}{\varphi_c^0 - \varphi_a^0} = \frac{BE}{AB};$$

- partea controlului ohmic 
$$\frac{I' R}{\varphi_c^0 - \varphi_a^0} = \frac{DE}{AB}.$$

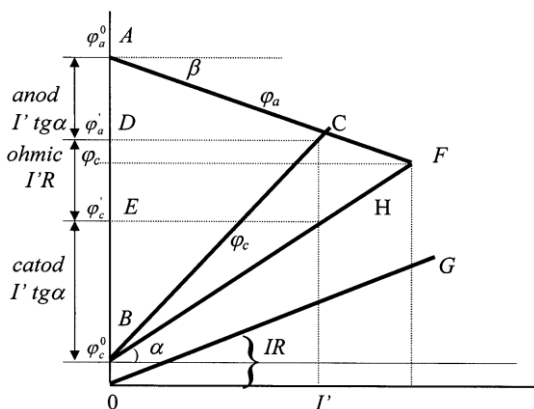


Fig.3 Diagrama procesului de coroziune:

- AF* - curba polarizării anodice;
- BH* - curba polarizării catodice;
- DE* - căderea potențialului ohmic;
- EB* - căderea potențialului în urma polarizării catodice;
- OG* - dreapta căderii ohmice a potențialului;
- BC* - curba polarizării catodice totale, ce ia în considerație căderea ohmică a potențialului și polarizarea.

Noțiunea despre procesul de limitare permite să stabilim în ce condiții se poate aștepta frânarea efectivă a procesului de coroziune în beton. Se poate spune, că cea mai universală este limitarea anodică deplină, legată de pasivarea oțelului în mediul bazic al betonului, când practic este exclusă trecerea ionilor de metal în electrolit.

La deranjarea pasivității oțelului în beton, din orice cauză, viteza de coroziune poate fi foarte mare.

## Concluzii

Starea umedă a betonului influențează considerabil viteza de coroziune. Betonul, fiind uscat până la greutatea constantă la temperatura de 90 °C, este un bun dielectric. Rezistența lui la trecerea curentului electric este de  $1 \cdot 10^4$  Ohm.

Măsurările au arătat ca rezistența betonului depinde de umiditatea lui. La variația umidității de la 35 până la 60 %, rezistența betonului crește puțin. La creșterea umidității relative până la 80 % și mai mult, rezistența ohmică scade, iar coroziunea armaturii poate avea o dezvoltare intensiva.

Caracteristica normală a oțelului în mediul bazic al betonului este pasivitatea. În anumite condiții, starea pasivă a suprafeței oțelului în beton se modifică și devine posibilă corodarea lui. Acest fapt este determinat de următoarele condiții:

- introducerea în beton a adaosurilor corosiv active (cloruri) sau difuzia lor din mediul exterior;
- micșorarea stării bazice a lichidului din beton mai jos de valoarea critică, pe calea spălării sau neutralizării cu gaze acidice  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;
- deteriorarea mecanică sau corosivă a stratului de protecție din beton;
- formarea fisurilor în beton.

## Bibliografie

1. Bohigas, A. C. (2002), Shear Design Or Reinforced High Strength Concrete Beams, Doctoral Thesis – UPC Barcelona.

2. Saatcioglu, M. (2003), Design of High-Strength Concrete Columns for Strength and Ductility, ACI SP-213: The Art and Science of Structural Concrete Design, p. 83-102

3. Брюханов О. Н., Шевченко С. Н. Тепломассообмен. М.: Издательство АСВ, 2005. - 460 с.14-17;

4. Шилин А. А. Проблемы создания и эксплуатации гидроизоляционной системы подземных и заглубленных сооружений. Тоннельная ассоциация. Семинар «Гидро-изоляция подземных сооружений. Москва, 25 – 26 января 2005 г. Тезисы докладов и сообщений. М., 2005 г.

5. Mertol, H.C., Rizkalla, S, Zia, P. and Mirmiram, A. (2008), Characteristics of Compressive Stress Distribution in High-Strength Concrete, ACI Structural Journal, p. 626-633.

7. Юхневич Р., Валашовский Е., Видуховский А., Станкевич Г. Техника борьбы с коррозией / Перевод с польск.; Под ред. А.М. Сухотина. - Л.: Химия, 2008. -394 с.

8. Бахчисарайцян Н. Г., Капустин Ю. И., Харламов В. И., Цупак Т. Е. Коррозия и защита металлов: Учеб. Пособие. – М.: Издательский центр РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2008. – 32 с.

9. Olar, R. (2009), Betonul de înaltă performanță, Teză de doctorat – U.T. Cluj-Napoca.

10. Tan, T.H., Nguyen, N.B. (2005), Flexural Behavior of Confined High Strength Concrete Columns, ACI Structural Journal, V.102, No. 2.