

**INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE ÎN CONSTRUCȚII ȘI
ECONOMIA CONSTRUCȚIILOR BUCUREȘTI • FILIALA CLUJ-NAPOCA**



Calea Florești nr. 117, 3400 Cluj-Napoca - CP 801 OP 12

Tel./Fax: +40.(0)264.425462, +40.(0)264.435.988

Website: www.incerc-cluj.ro

E-mail: info@incerc-cluj.ro

*MEMBRU ÎN UNIUNEA EUROPEANA PENTRU
AGREMENTE TEHNICE ÎN CONSTRUCȚII*



*MEMBRU ÎN FEDERAȚIA MONDIALĂ A ORGANIZAȚIILOR
PENTRU EVALUARE TEHNICĂ*



*MEMBRU ÎN REȚEAUA EUROPEANA A
INSTITUTELOR DE CERCETĂRI
ÎN CONSTRUCȚII*



*MEMBRU OBS. ÎN ORGANIZAȚIA EUROPEANĂ
PENTRU AGREMENTE TEHNICE*



**DURABILITATEA ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR
DE BETON PRECOMPRIMAT**

- Draft -

Iunie 2005

AUTORI

Coordonator: *prof. dr. ing.* Călin MIRCEA

| Colaboratori (în ordine alfabetică) | Contribuții |
|---|------------------------------|
| <i>CS II ing.</i> Ana COSMA | <i>cap. 6</i> |
| <i>CS III ing.</i> Mircea COSMA | <i>cap. 6</i> |
| <i>CS III ing.</i> Carmen DICO | <i>cap. 1, cap. 3</i> |
| <i>prof. dr. ing.</i> Julietta DOMȘA | <i>cap. 5</i> |
| <i>CS II ing.</i> Carol ENYEDI | <i>cap. 2, cap. 3</i> |
| <i>CS III ing.</i> Mihai FILIP | <i>cap. 4, cap. 6</i> |
| <i>AC ing.</i> Andreea HEGYI | <i>cap. 2</i> |
| <i>prof. dr. ing.</i> Adrian IOANI | <i>cap. 2, cap. 3</i> |
| <i>prof. dr. ing.</i> Anton IONESCU | <i>cap. 2, cap. 3</i> |
| <i>CS I ing.</i> Maria IRIMIES | <i>cap. 2, cap. 6</i> |
| <i>prof. dr. ing.</i> Zoltan KISS | <i>cap. 2</i> |
| <i>șef lucr. dr. ing.</i> Andreea MIRCEA | <i>cap. 2, cap. 5</i> |
| <i>prof. dr. hc. ing.</i> Traian ONEȚ | <i>cap. 1, cap. 3</i> |
| <i>CS ing.</i> Henriette SZILAGYI | <i>cap. 5</i> |
| <i>AC ing.</i> Horea NICOARA | <i>cap. 2</i> |
| <i>CS III dr. ing.</i> Mircea PASTRAV | <i>cap. 2, cap. 4</i> |
| <i>AC ing.</i> Minodora PÂRLEA | <i>cap. 1</i> |
| <i>CS II dr. ing.</i> Liana TEREÇ | <i>cap. 5</i> |

CUPRINS

| | |
|--|----|
| 1 ASPECTE INTRODUCATIVE | 1 |
| 1.1 Principiile fundamentale ale precomprimării | 2 |
| 1.2 Tendințe în domeniul precomprimării | 2 |
| 1.3 Protecția armăturilor pretensionate | 4 |
| 1.3.1 <i>Armături autoprotejate prin galvanizare</i> | 4 |
| 1.3.2 <i>Armături autoprotejate prin peliculizare cu polimeri</i> | 4 |
| 1.3.3 <i>Cabluri cu teacă generală protejate prin injectare cu pastă de ciment</i> | 5 |
| 1.3.4 <i>Cabluri pretensionate protejate cu produse vâscoase</i> | 5 |
| 2 DEGRADAREA ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR DE BETON PRECOMPRIMAT | 7 |
| 2.1 Cauzele degradării structurilor din beton precomprimat | 7 |
| 2.2 Mecanismele coroziunii oțelului înglobat în beton | 8 |
| 2.3 Fenomene care conduc la coroziunea activă a oțelului înglobat în beton | 9 |
| 2.3.1 <i>Carbonatarea betonului</i> | 9 |
| 2.3.2 <i>Penetrarea ionilor de clor în masa betonului</i> | 10 |
| 2.3.3 <i>Acțiunea combinată a ionilor de clor și a carbonatării</i> | 11 |
| 2.4 Degradarea prin coroziune | 12 |
| 2.5 Degradarea prin îmbătrânire | 12 |
| 2.6 Degradarea prin oboseală | 13 |
| 2.7 Degradarea la foc | 14 |
| 3 DURABILITATEA ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR DE BETON PRECOMPRIMAT | 16 |
| 3.1 Noțiuni introductive | 16 |
| 3.2 Modele analitice | 16 |
| 3.3 Principiile de bază ale proiectării | 20 |
| 3.4 Procedee moderne de reabilitare | 22 |
| 3.4.1 <i>Consolidarea prin pretensionare exterioară</i> | 22 |
| 3.4.2 <i>Consolidarea cu armături compozite din fibre de carbon</i> | 23 |
| 4 MONITORIZAREA STRUCTURILOR DE BETON PRECOMPRIMAT | 25 |
| 4.1 Programul de monitorizare | 25 |
| 4.2 Verificări în cadrul inspecțiilor tehnice | 26 |
| 4.3 Metode tradiționale și moderne de încercare nedistructivă | 27 |
| 4.3.1 <i>Analiza răspunsului acustic</i> | 27 |
| 4.3.2 <i>Încercarea în laborator a carotelor</i> | 28 |
| 4.3.3 <i>Metoda indicelui de recul</i> | 28 |
| 4.3.4 <i>Metoda ultrasonică de impuls</i> | 28 |
| 4.3.5 <i>Metoda semidistructivă</i> | 29 |
| 4.3.6 <i>Radiografierea</i> | 29 |
| 4.3.7 <i>Tomografierea computerizată</i> | 30 |
| 4.3.8 <i>Scanarea electromagnetică de suprafață</i> | 31 |
| 4.3.9 <i>Ecol de impactului</i> | 32 |
| 4.3.10 <i>Perturbarea câmpului magnetic</i> | 33 |
| 4.3.11 <i>Polarizarea liniară</i> | 35 |
| 4.3.14 <i>Monitorizarea emisiei acustice</i> | 35 |
| 4.4 Cuantificarea stării tehnice a unui element | 36 |
| 5 NOI CONCEPTE PENTRU CREȘTEREA DURABILITĂȚII | 40 |
| 5.1 Betonul autocompactant | 40 |
| 5.1.2 <i>Materialele constituente și caracteristici</i> | 41 |
| 5.1.3 <i>Caracteristicile betonului în stare proaspătă</i> | 42 |
| 5.1.4 <i>Malaxarea și transportul betonului autocompactant</i> | 43 |
| 5.2 Betonul compozit cu fibre disperse | 43 |
| 5.2.1 <i>Comportarea betonului compozit cu fibre disperse din oțel</i> | 44 |
| 5.2.2 <i>Orientarea și distribuția fibrelor</i> | 45 |
| 5.2.3 <i>Aderența fibre-beton</i> | 46 |
| 6 CERCETĂRI EFECTUATE ÎN CADRUL PROGRAMULUI EUCONS | 49 |
| 6.1 Fundamentele cercetării | 49 |
| 6.2 Inventariere și investigații in situ | 49 |
| 6.3 Cercetări experimentale | 52 |

1 ASPECTE INTRODUCTIVE

Statistici neoficiale menționează pierderi de circa 1100 USD în SUA și 1000 € în Europa de Vest suportate de către fiecare contribuabil datorită coroziunii. Acestea se regăsesc în pierderile de material și cheltuielile directe legate de dezafectarea și demolarea construcțiilor nesigure, întreținere și reparații curente, alte cheltuieli de capital. Pierderile indirecte însă, datorate de exemplu întârzierilor în trafic și producție, reducerii productivității, suspendării temporare a funcționalității, consumurilor suplimentare etc., se estimează a fi însă de peste 10 ori mai mari. În prezent, dacă proiectarea structurilor de beton precomprimat se bazează pe modele analitice de calcul bine fundamentate și adaptate tipului soluției structurale (în Europa se poate face referire la codurile de practică Eurocode 2, CEB-FIP Model Code, standardele de produs EN 10138 și EN 10080), funcțiunii specifice și mediului de exploatare, administrarea lor se face în cea mai mare parte prin alocări aleatorii de resurse financiare. Însă, practica ultimilor 10 ani dovedește că monitorizarea stării patrimoniului construit și alocarea, argumentată în baza acesteia, a fondurilor de întreținere și reparații sunt cea mai potrivită strategie.

În România starea tehnică a construcțiilor din beton precomprimat este departe de a fi controlată. Dacă în domeniul infrastructurii transporturilor pentru poduri există o bază de date care cuantifică principalii parametri și starea tehnică generală, nu există date centralizate pentru alte tipuri de structuri. Această situație se manifestă pe fondul unui relativ deficit de specialiști în domeniu, resurse financiare limitate, un cadru legal incomplet și un mediu cu zone caracterizate de o agresivitate puternică.

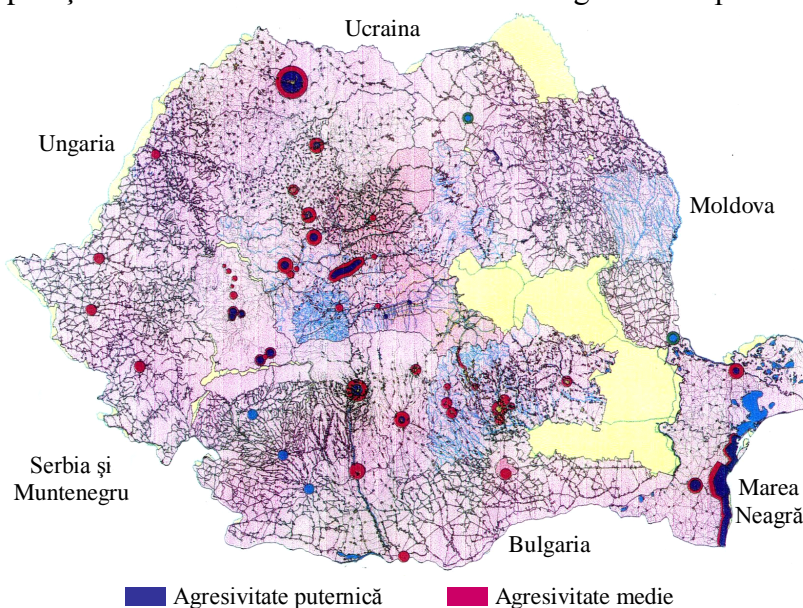


Fig. 1.1 Harta agresivității mediului în România

1.1 Principiile fundamentale ale precomprimării

Betonul precomprimat este, după cum se știe, o combinație activă între betonul de înaltă rezistență și oțelul de calitate superioară, prin tensionarea armăturii din oțel și inducerea, pe această cale, a unui efort de compresiune în beton înainte de aplicarea încărcărilor exterioare asupra elementului structural.

Această asociere de eforturi de semn contrar conduce la o utilizare mult mai avantajoasă a celor două materiale constituente și la sporirea performanțelor structurii. Ameliorarea comportării structurii este posibilă deoarece eforturile unitare produse de cele două categorii de acțiuni – precomprimarea și încărcările exterioare – sunt de semn contrar. ca urmare, eforturile de întindere din beton pot fi eliminate sau reduse la valori acceptabile. prima alternativă definește precomprimarea totală iar cea de a doua precomprimarea parțială .

Utilizarea betonului precomprimat la realizarea elementelor structurale sau a structurilor de rezistență conduce la obținerea următoarelor avantaje:

- precomprimarea face posibilă utilizarea integrală a secțiunii transversale din beton la preluarea eforturilor, rezultând secțiuni mai mici la o deschidere dată sau deschideri mai mari la o secțiune anumită;
- funcționarea sub sarcini de exploatare fără fisuri imprimă un aspect mai plăcut al elementelor, o impermeabilitate la lichide, o protecție mai bună a armăturii împotriva coroziunii și o durabilitate mai mare la preț de cost convenabil;
- precomprimarea permite controlarea săgeților și a capacității portante la forfecare a elementelor;
- calitatea betonului și armăturii mai bună decât în elementele din beton armat conduce la avantaje tehnice și economice importante;
- rigiditatea mai mare a secțiunilor sub sarcini de exploatare, rezistența sporită la impact și oboseală, posibilitatea de prefabricare în bucăți (bolțari) asamblate prin întinderea ulterioară a armăturilor constituie alte avantaje demne de menționat.

Construcțiile din beton precomprimat prezintă și unele dezavantaje :

- cofrajele (tiparele) sunt mai complicate, necesitând un spor de manoperă și de preț de cost;
- este necesar un control mai riguros la execuție;
- forța de precomprimare este afectată în timp de pierderi de tensiune;
- procesul de proiectare este mai complex;
- necesită dispozitive speciale de pretensionare și de ancorare a armăturilor precum și o alcătuire specială a zonelor în care acestea sunt dispuse.

Domeniile eficiente de utilizare a precomprimării cuprind: structurile de retenție, conductele de presiune, tiranții, plăcile, grinzile și stâlpii (în construcții civile, industriale, poduri, construcții energetice), învelitori subțiri, piloți, traverse de cale ferată.

Practic toate elementele structurale pot fi precomprimare, cu avantaje mai mult sau mai puțin importante în funcție de gradul de precomprimare adoptat.

În general, alegerea gradului de precomprimare la proiectare se face dependent de tipul și destinația elementului de construcție, de mărimea deschiderii acestuia, de forma secțiunii transversale, de natura încărcărilor, de frecvența suprasolicităților care produc eforturi de întindere, de condițiile climatice ambientale, de exigențele față de fisurare, de condițiile de deformare și de rezistența la oboseală preconizată.

1.2 Tendințe în domeniul precomprimării

Sub aspect tehnic, elementele și structurile din beton precomprimat au un potențial excepțional de durabilitate. Cu toate acestea, practica curentă de proiectare a

elementelor de beton precomprimat focusează atenția inginerilor structuriști în principal pe satisfacerea criteriilor de performanță privind siguranța structurală (satisfacerea exigențelor la Stările Limită Ultime) și comportarea în exploatare (satisfacerea exigențelor Stărilor Limită ale Exploatării Normale), noțiunea de durabilitate fiind considerată intrinsecă dacă se satisfac specificațiile de proiectare privind grosimea stratului de acoperire cu beton, compoziția betonului etc. În prezent, comunitatea inginerească se află în pragul conștientizării însă a următoarelor aspecte:

- respectarea acestor măsuri constructive de proiectare conduce doar la o durată de exploatare (și în consecință durabilitate) rezonabilă dar necontrolată, fără posibilitatea de estimare cu o acuratețe rezonabilă a cheltuielilor ce apar în exploatare cu întreținerea, repararea și reabilitarea structurilor;
- în foarte multe standarde și norme de proiectare, măsurile constructive sunt insuficiente sau mult prea riguroase în raport cu situația concretă de proiectare (de exemplu în raport cu agresivitatea mediului de exploatare)
- asigurarea durabilității structurilor necesită pe lângă abilități de analiză structurală și înțelegerea fenomenelor de degradare a betonului, respectiv a armăturii active și pasive.

În practica europeană de proiectare, care în curând va fi asimilată și în România, pe termen scurt se va impune noțiunea de proiectare a duratei de exploatare, bazată pe performanța structurilor în această perioadă. Aceste noțiuni integrate metodei de proiectare a stărilor limită sunt un pas calitativ superior. De exemplu, în cazul coroziunii, un fenomen ca depasivarea armăturii poate fi ușor integrat în analizele la Stările Limită ale Exploatării Normale alături de fisurare (fenomene raportate durabilității), iar clivajul betonului și pierderea de aderență (fenomene raportate atât durabilității cât și siguranței), pot fi considerate la Stările Limită Ultime alături de noțiunea de colaps.

Aceste aspecte au o importanță foarte mare mai ales în cazul administratorilor de stocuri mari de structuri de beton precomprimat (cazul agențiilor de drumuri și poduri, de asigurare a apei potabile, marile parcuri industriale etc.).

Un alt aspect cu impact deosebit asupra calității și stării tehnice a patrimoniului construit din beton precomprimat este cel administrativ. În România, restructurările de după 1990 care au avut lor în diversele instituții administratoare de stocuri construite din beton precomprimat, incoerența cadrului legislativ, superficialitatea actului administrativ și lipsa resurselor financiare au condus în unele situații la arhive tehnice incomplete, lipsa programelor de urmărire în timp precum și a persoanelor specializate responsabile cu acestea, neefectuarea (sau efectuarea necorespunzătoare) lucrărilor curente de întreținere și reparații. În Europa de Vest, sub acest aspect, în ultimii 10 ani s-a produs o efervescență deosebită în ce privește perfecționarea și informatizarea strategiilor de întreținere și reabilitare a stocurilor de structuri, care pe termen mediu se doresc a fi extrapolate prin programe educative și informative de la specialiști către practicieni (în acest sens se poate menționa efortul făcut prin programul de cercetare cadru 6 REHABCON – Strategy for Maintenance and rehabilitation in concrete structures).

Execuția structurilor din beton precomprimat este mai pretențioasă decât a structurilor din beton armat, motiv pentru care implementarea tehnologiilor de precomprimare necesită personal mai specializat și o supraveghere mai riguroasă a calității execuției. În țară, majoritatea elementelor precomprimate s-au executat în poligoane de prefabricate, numărul lucrărilor cu caracter de unicat fiind redus. Cu toate acestea, erorile de execuție (mai ales la montajul unităților prefabricate) sunt și ele surse de degradare în regim accelerat, mai ales când se suprapun lipsei de

profesionalism a proiectanților (de exemplu situațiile în care lucrările sunt insuficient detaliate).

1.3 Protecția armăturilor pretensionate

Dacă în cazul armăturilor preîntinse protecția este asigurată de mediul alcalin oferit de pasta de ciment întărită și betonul înconjurător (prin pasivare), în cazul armăturilor neaderente este necesară o strategie de protecție mai complexă, care să ia în considerare atât condițiile de agresivitate ale mediului pentru protecția împotriva coroziunii, cât și considerente privind siguranța armăturii active, plecând în principal de la protecția ei la foc și protecția împotriva cedării armăturii datorită frecării în zonele de deviere.

1.3.1 Armături autoprotejate prin galvanizare

Aceste armături sunt alcătuite din sârme, bare sau toroane autoprotejate prin galvanizare la cald, utilizarea lor necesitând măsuri speciale în ce privește accesoriile și materialele pentru punerea în operă. Se pot face câteva observații:

- galvanizarea nu asigură o protecție nelimitată în timp, durabilitatea ei depinzând de agresivitatea mediului;
- în zonele de deviere, integritatea galvanizării este pusă în pericol de frecările care apar;
- zonele de ancorare necesită un studiu particular privind protecția; ea poate fi asigurată prin injectarea locală cu produse vâscoase sau vopsire cu carbomastic; în timp s-a constatat că este preferabil ca ancorajul să se bucure el însuși de aceeași protecție ca și cablul, astfel încât piesele reazemelor și ancorajele trebuie în egală măsură protejate; această măsură este necesară pentru a nu permite extinderea fenomenului de ruginire de la piesele de ancorare asupra porțiunilor de cabluri amplasate în vecinătatea ancorajului, unde protecția prin galvanizare poate fi deteriorată.

Acest tip de cablu este comod de pus în operă, autoprotecția toroanelor înlăturând necesitatea introducerii cablului în teacă, dar folosirea lui trebuie efectuată cu discernământ. Se atrage atenția asupra unor dezavantaje care pot apărea în momentul punerii în operă:

- avarieri locale ale protecției galvanice datorate galeților echipamentelor de împingere;
- dificultăți de înșiruire a toroanelor la traversarea verinelor datorate grosimii excesive a stratului de zinc;
- o galvanizare de slabă calitate poate diminua diametrul conului penelor din ancoraje, în final creându-se neregularități locale.

Utilizarea acestor armături este recomandabilă la construcții civile sau alte tipuri de lucrări unde cablurile nu sunt expuse la o agresivitate deosebită a mediului. Aceste toroane pot fi puse în operă cu echipamente ușoare, prin înșiruire toron cu toron sau prin tensionarea simultană a tuturor toroanelor cablului.

1.3.2 Armături autoprotejate prin peliculizare cu polimeri

Această tehnologie s-a dezvoltat în special pentru armăturile pasive, peliculele din polimeri fiind aplicate pe oțel prin fuziune. Procedeele sunt întâlnite în primul rând la armăturile de tip bare și toroane, dar viabilitatea acestei soluții nu a fost încă pe deplin dovedită în cazul pretensionării. În cazul toroanelor apar probleme deoarece numai suprafața exterioară a sârmelor toroanelor este protejată, sârma centrală și

suprafața interioară a sârmelor perimetrare fiind neprotejate. În ancoraje, peliculizarea este întreruptă local prin indentațiile produse de zimții penelor ancorajelor. Astfel, ca și în cazul armăturilor galvanizate, protecția în zona ancorajelor este compromisă. În plus, manipularea și punerea în operă a acestor armături trebuie efectuată cu foarte mare atenție pentru a nu deteriora pelicula protectoare. Se recomandă același domeniu de aplicabilitate ca și în cazul armăturilor galvanizate.

1.3.3 Cabluri cu teacă generală protejate prin injectare cu pastă de ciment

Principiul constă în utilizarea unei teaci flexibile din polietilenă de înaltă densitate sau propilenă, continuă și etanșă de la un ancoraj la altul și izolată de structura din beton prin țevi și trompete din oțel. Teaca poate să gliseze liberă prin străpungerile în beton (rosturi între elemente prefabricate, deflectori, zone de ancorare), iar după injectare este posibilă demontarea întregului ansamblu: toroane, teacă și injecție din pastă de ciment. Problemele principale care se pun sunt:

- asigurarea rezistenței teicii din polietilenă în zonele de deviere a toroanelor din zonele de ancorare și deviatori sub efectele conjugate ale curburii toroanelor și deplasărilor lor datorate alungirii cablului, respectiv ale eforturilor radiale care apar între operațiunile de tensionare și injectare; după întărirea pastei de ciment transferul de eforturi radiale este mult mai puțin sever, cablul devenind monolitic;
- asigurarea etanșeității în timpul operațiunii de injectare a teicii în racordurile curente și la joncțiunea dintre cele două tuburi ale zonei de ancorare, cel din polietilenă care conține toroanele și cel exterior, din oțel laminat, care asigură demontabilitatea.

Ambele probleme au fost rezolvate în mod satisfăcător (figura 1.2), dar mai constituie încă și astăzi o tematică de cercetare, menită a perfecționa sistemul.

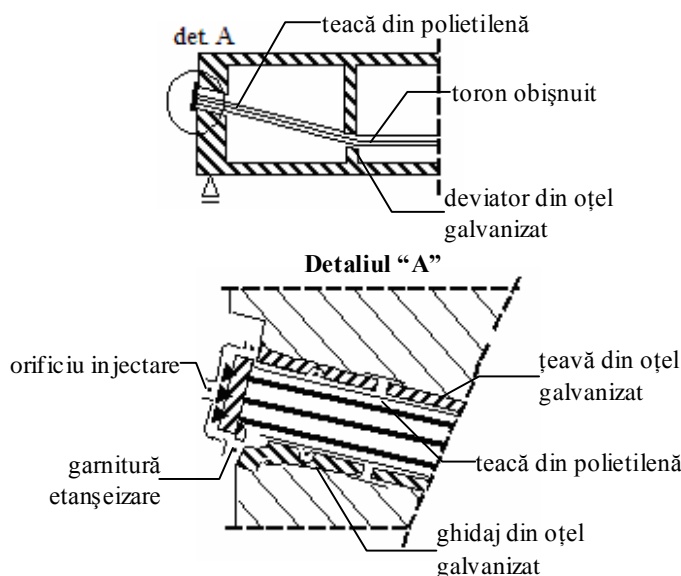


Fig. 1.2 Sistem de pretensionare exterioră cu injecție rigidă

1.3.4 Cabluri pretensionate protejate cu produse vâscoase

În prezent, tehnologiile moderne ale betonului precomprimat se bazează pe principiul neaderenței între armătura activă și structura de beton. Cu toate acestea, cele mai moderne sisteme de pretensionare prezintă următoarele deficiențe:

- sistemele "pachet" (figura 1.3.a), realizate din toroane introduse prin împingere

într-o teacă generală predeformată din material plastic (de obicei polietilenă de înaltă densitate), în timp ce materialul vâscos de protecție (ceară petrolieră sau lubrifiant) se aplică pe măsura introducerii toroanelor; în acest sistem, de obicei, nu este posibilă umplerea completă cu substanța de protecție a spațiului dintre toroane și a imperfecțiunilor tecii; acest tip de cablu este vulnerabil la infiltrarea apei pe timpul execuției și transportului, iar în anumite condiții chiar și în exploatare;

- sistemele "sigilate la cald" (figura 1.3.b) utilizează toroane pregresate în jurul cărora se aplică o folie dreptunghiulară din plastic; în final, folia din plastic este sigilată la cald; sistemul de protecție rezultat constă dintr-o teacă cel puțin la fel de neregulată și mai strâmtă decât la sistemul prezentat anterior;

- sistemele "extrudate" (figura 1.3.c) sunt de fapt toroane pregresate pe care se aplică plastic topit simultan cu trecerea printr-o matriță, pentru a se realiza o grosime controlată și uniformă; după trecerea prin matriță plasticul este răcit în apă, solidificându-se; acest proces produce o contracție a tecii care comprimă materialul de protecție, iar sistemul este cel mai des utilizat în zilele noastre, fiind și cel mai puțin vulnerabil la coroziune.

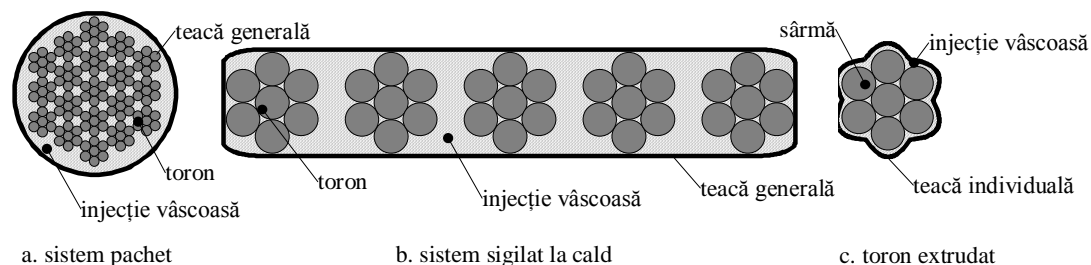


Fig. 1.3 Sisteme moderne de post-tensionare

2 DEGRADAREA ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR DE BETON PRECOMPRIMAT

2.1 Cauzele degradării structurilor din beton precomprimat

Cauzalitatea degradării structurilor de beton armat în general, a structurilor din beton precomprimat este foarte vastă (figura 2.1). Pe lângă fenomenele fizice și chimice obiective, intervenind și factori subiectivi ca și erorile de proiectare și execuție, nivelul cunoașterii în domeniu la momentul construirii, vicii de fabricație.

În categoria cauzelor obiective cu caracter de lungă durată s-au identificat:

- corозиunea armăturilor din oțel (fenomen de natură electrochimică, datorită carbonatării și/sau penetrării ionilor de clor);
- degradarea betonului datorită agresivității chimice (sub acțiunea ionilor de clor, sărurilor de amoniu și vaporilor de acid sulfuric etc.);
- oboseala (fenomen înregistrat la infrastructura transporturilor și căi de rulare);
- îmbătrânirea.

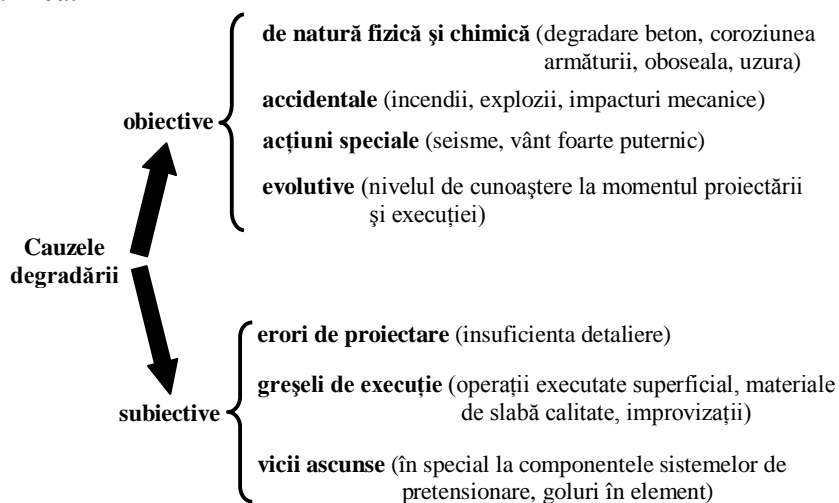


Fig. 2.1 Clasificarea cauzelor care conduc la degradarea elementelor și structurilor de beton precomprimat

În categoria cauzelor obiective cu caracter accidental degradarea se consideră a avea loc în timpul incendiilor, sub acțiunea focului. Alte acțiuni speciale (seisme, explozii) pot produce și ele degradări, dar sunt foarte puțin specifice elementelor precomprimate. Deocamdată, în România nu s-au identificat elemente precomprimate care să facă parte din structura antisismică sau care să fi suferit degradări din explozii.

Cauze subiective:

- erori de proiectare: stau la baza degradării în regim accelerat a elementelor de

beton precomprimat prin una din cauzele obiective deoarece în multe cauze proiectele de execuție nu s-au detaliat suficient (lăsând loc pentru improvizații în execuție);

- nivelul de cunoaștere în momentul construirii: se reflectă în simplitatea metodelor de proiectare (fenomene necontrolate) și nivelul tehnologic existent;
- erori de execuție: insuficienta atenție acordată modului de rezolvare a unor subansamble (de exemplu sistemele de hidroizolare), punerea în operă a unor betoane de calitate slabă, nerealizarea gradului de precomprimare proiectat, manipularea neîngrijită și injectarea superficială a tecilor de protecție a cablurilor postîntinse conduc și ele la manifestarea factorilor obiectivi;
- vicii de fabricație: acestea se înregistrează cu precădere în cazul armăturilor active care ascund eforturi remanente, reduceri secționale, frecări metal-metal și de multe ori cedează sub nivelul sarcinilor de exploatare.

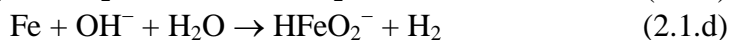
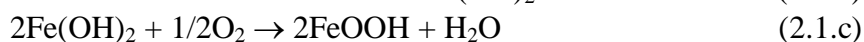
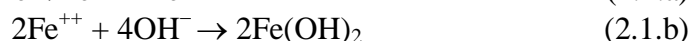
2.2 Mecanismele coroziunii oțelului înglobat în beton

Coroziunea oțelului este un proces natural, fiind consecința reacției sale cu mediul înconjurător. În stare naturală, majoritatea metalelor se prezintă sub formă de oxizi stabili din punct de vedere chimic. În contact cu oxigenul sau alți agenți oxidanți, metalele tind să se reîntoarcă la starea lor naturală de oxizi, dând naștere la produse care pentru oțel sunt cunoscute sub denumirea de rugină. Energia indusă în timpul proceselor de fabricație asigură suportul necesar fenomenului de propagare a coroziunii.

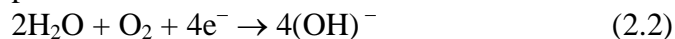
Coroziunea oțelului în beton este un proces de natură electrochimică, implicând transferul sarcinilor electrice (electronilor) dintr-un material în altul. Pentru ca să apară o reacție electrochimică (în absența unei surse electrice externe), trebuie să existe două reacții:

- o reacție capabilă să genereze electroni - reacție anodică, oxidarea fierului (Fe), formarea ionilor de fier;
- și o reacție capabilă să consume electronii - reacție catodică, adică reducerea oxigenului pentru formarea ionilor de hidroxil (OH⁻).

Când cele două reacții (focarele de coroziune) apar în locuri separate la distanță mare, ele sunt numite macro celule; iar când apar alăturat, sau practic în același loc, ele se numesc microcelule. Astfel, pentru oțelul înglobat în beton, reacțiile anodice implică oxidarea sau disoluția fierului, adică:



Reacțiile catodice cele mai probabile sunt:



Într-un caz particular, tipul de reacție care va avea loc (anodică sau catodică) va depinde de cantitatea de oxigen prezentă și de pH-ul soluției pastei de ciment din apropierea oțelului.

Pentru un beton compact (sănătos), pH-ul soluției interstițiale este în domeniul 13.0 la 13.5, domeniu în care reacțiile anodice (2.1.a) și (2.1.b) sunt cel mai probabil să se producă. În absența oricărui alți factori, oxizii de fier Fe₂O₄ și Fe₂O₃, sau hidroxizi ai acestor componenți, se vor forma ca faze solide și vor produce o peliculă de protecție pe suprafața oțelului (fenomen numit pasivizare). Dacă pH-ul soluției interstițiale este redus (de exemplu de carbonatare sau de o reacție puzzolanică)

sistemul poate fi deplasat într-o altă zonă, în care acești oxizi nu formează un strat de protecție și este posibilă soluția activă. Teoretic, coroziunea activă poate fi de asemenea indusă mărind pH-ul la o valoare la care are loc reacția (2.1.d) și pentru care HFeO_2^- este un produs termodinamic stabil. Reacția (2.1.c) poate de asemenea avea loc la un pH normal al betonului la temperaturi înalte ($>60^\circ\text{C}$). Diferența de potențial electric dintre armăturile din oțel înglobate în beton (chiar și între zone ale aceleiași bare) conduce la formarea curentului continuu a cărui propagare este asigurată de betonul înconjurător (mediu electrolitic). Datorită transferului de electroni dinspre anod spre catod, armătura anodică suferă un proces de fragilizare și laminare. De asemenea, are loc o creștere de volum a armăturii din oțel, de până la circa 6 ori, în funcție de tipul reacției și a compușilor rezultați, așa cum se arată în figura 2.2.

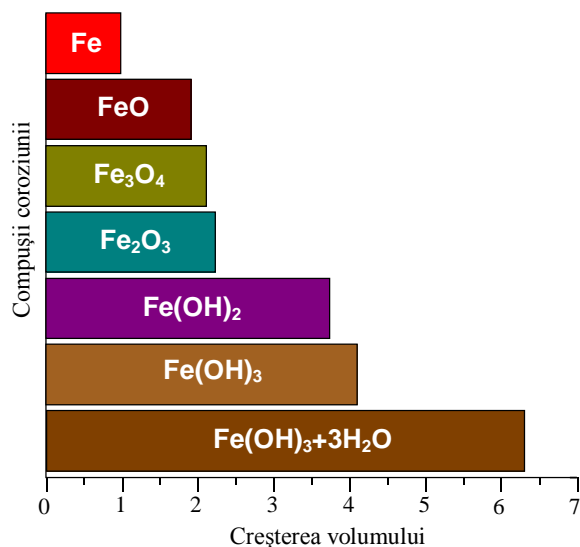


Fig. 2.2 Creșterea în volum a produșilor corozivii

Prin creșterea în volum a armăturii din oțel se creează o presiune radială asupra betonului imediat înconjurător. Această presiune conduce la apariția locală a eforturilor de întindere și apariția microfisurilor în beton. Propagarea acestor microfisuri se materializează în cele din urmă în macrofisurarea elementului de beton precomprimit, precum și la dislocări locale ale stratului de acoperire cu beton, așa cum se pune în evidență în figura 2.3.

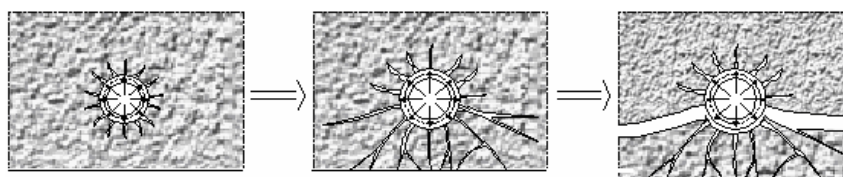


Fig. 2.3 Fisurarea și dislocarea betonului în zona barei corodate

2.3 Fenomene care conduc la coroziunea activă a oțelului înglobat în beton

2.3.1 Carbonatarea betonului

Prin carbonatare se înțelege fenomenul de neutralizare a betonului prin reacția dintre componenții alcalini ai pastei de ciment și dioxidul de carbon (CO_2) din atmosferă. Deoarece reacția se dezvoltă în soluție, primul indiciu al carbonatării este o scădere a pH-ului în soluția interstițială la valori sub 9, nivel la care pelicula pasivă de

pe oțel nu este stabilă. Carbonatarea se manifestă în principal în straturile superficiale ale betonului. Când însă carbonatarea de la suprafață se extinde până la armătură, poate să apară depasivarea generală pe zone largi sau pe întreaga suprafață a oțelului și poate începe coroziunea generală.

Rata de carbonatare în betonul compact (sănătos/robust) este în general mică. Totuși, betonul situat în sau în apropierea zonelor industriale, poate să prezinte rate mai mari de carbonatare datorită creșterii concentrației de CO₂ în mediul industrial. În condiții naturale, concentrația CO₂ în aer este de circa 0.03%; în orașe și poate crește de maximum 10 ori, dar în zonele industriale poate fi de 100 ori mai mare decât nivelurile care sunt în mediu natural.

Penetrarea gazelor este mai mare la umidități relative scăzute, dar reacția între CO₂ și pasta de ciment are loc în soluție și este mai mare la umidități ridicate. De aceea, cel mai agresiv mediu pentru neutralizare va fi cel al ciclurilor alternante umed-uscat la temperaturi mari. În condiții constante, un mediu cu umiditate relativă de 60% este fost cel mai favorabil pentru carbonatare. Alți 3 factori majori care influențează duratele de inițiere coroziunea indusă prin carbonatare sunt: stratul de acoperire cu beton, prezența fisurilor, porozitatea mare asociată cu un conținut scăzut de ciment și un factor apă/ciment mare.

Un efect secundar al carbonatării este că se reduce porozitatea betonului, reducându-se astfel permeabilitatea și crescând rezistențele betonului.

2.3.2 Penetrarea ionilor de clor în masa betonului

Atât concentrarea pe suprafață cât și transportul ionilor de clor sunt fenomene în strânsă legătură cu migrația umidității în masa betonului, cu temperatura sa, natura eforturilor și nivelul stării de solicitare, precum și compoziția betonului. Transport al ionilor de clor în masa betonului are loc prin difuzie. O concentrație în creștere a ionilor de clor în masa betonului elementelor de beton precomprimat inițiază procesul de degradare prin depasivarea armăturii active și/sau pasive, odată se atinge concentrația critică. Odată atinsă concentrația critică de ioni de clor în masa betonului, aceștia în contact cu oțelul distrug local pelicula protectoare creată de factorul pH mare al betonului, fenomen cunoscut sub denumirea de pasivizare. Prezența umidității și a oxigenului (în fisuri) în aceste zone conduce la apariția și extinderea focarelor de coroziune în armăturile active și/sau pasive. Deoarece concentrația ionilor de clor este variabilă în masa de beton a elementului, se creează de asemenea condițiile pentru inițierea coroziunii electrochimice.

După perioada de incubație, necesară atingerii concentrației critice a ionilor de clor, elementele fisurate (precomprimate total) suferă o degradare progresivă (faza de propagare). În cazul elementelor precomprimate parțial (fisurate), după o inițiere timpurie a fazei de propagare urmează o etapă de propagare într-un mai lentă (faza de propagare întârziată) datorită produselor coroziunii care tind să repasiveze armătura, propagarea în regim progresiv survenind totuși mai rapid decât în cazul elementelor precomprimate total.

Diferența de potențial electric dintre armăturile din oțel înconjurate de o concentrație mare de ioni de clor (anod) și cele aflate într-un volum cu o concentrație redusă de ioni de clor (catod) conduce la formarea unui curent electric continuu a cărui propagare este asigurată de betonul înconjurător (mediu electrolitic), așa cum se pune în evidență în figura 2.4.

Valorile critice ale concentrației de ioni (la care începe procesul de depasivare a oțelului beton) în masa de betonului sunt de circa 0.6-1.5 kg/m³ (0.36-0.45 % Cl⁻/ciment). Proveniența ionilor de clor este diversă, fenomenul fiind în strânsă

legătură cu aceasta. Există în principal trei surse principale:

- clorul din compuşii specifici mediului industrial (HCl, Ca Cl₂ etc.);
- clorurile din mediului marin (zonele de coastă, flux-reflux și submersă);
- clorul înglobat în aditivii betonului: utilizarea CaCl₂ ca și accelerator de priză conduce la scăderea pH-ului betonului; alți aditivi însă, pe bază de NaCl și KCl au tendința de a ridica factorul pH.

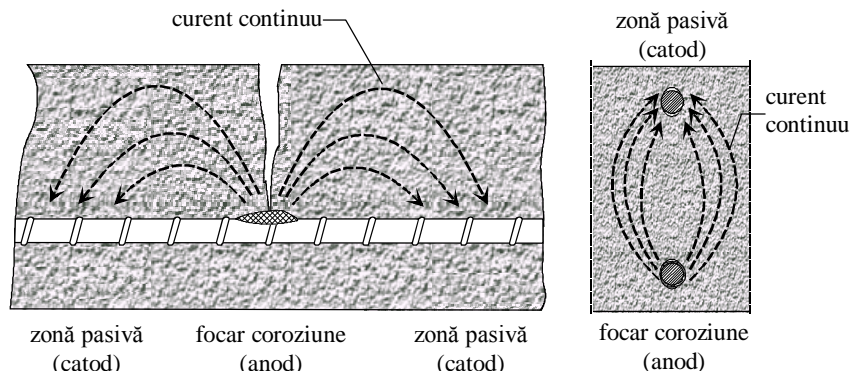


Fig. 2.4 Coroziunea electrochimică a armăturii în prezența Cl⁻

2.3.3 Acțiunea combinată a ionilor de clor și a carbonatării

Conținutul în ioni de clor la suprafața betonului atinge valori mai mari decât în cazul betonului necarbonat și poate fi mult mai mare decât nivelurile măsurate imediat sub suprafața betonului. Astfel crește riscul de inițiere a coroziunii când adâncimea de carbonatare ajunge la armătură. Deși carbonatarea mărește compactitatea betonului, conducând la o încetinire a difuziei ionilor de clor în masa betonului, valorile critice ale concentrației ionilor de clor scad, astfel încât riscul de coroziune este mult mai mare.

Scăderea pH-ului betonului carbonat mărește de asemenea riscul coroziunii deoarece concentrația de cloruri necesară pentru inițierea coroziunii, valorile limită, scad cu pH-ul, deoarece, la scăderea pH-ului, clorurile de aluminiu se distrug, eliberând clorurile legate. Figura 2.5 prezintă o sinteză a riscului de inițiere a coroziunii datorită ionilor de clor.

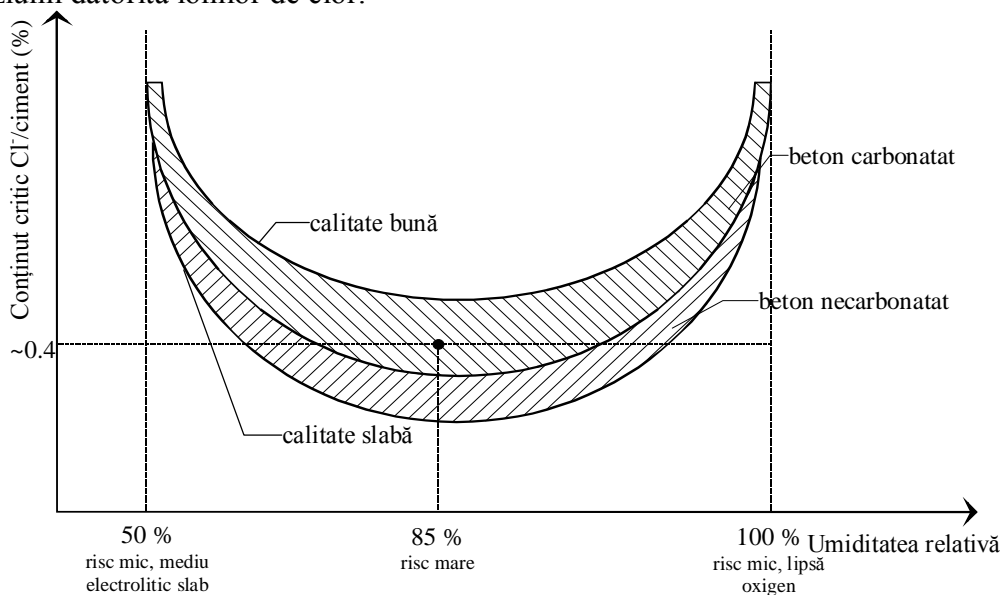


Fig. 2.5 Riscul de inițiere a coroziunii datorită Cl⁻

2.4 Degradarea prin coroziune

Fenomenul de degradare datorită coroziunii elementelor de beton precomprimat este neliniar și evoluția sa este mult influențată de starea de eforturi și deformații din exploatare (figura 2.6).

Cedarea prematură a elementelor liniare are loc prin depășirea capacității portante în secțiunile critice datorită reducerii secțiunii armăturii active și/sau pasive, asociată cu pierderea de aderență dintre armătură și beton în secțiunile critice. La elementele de suprafață, cedarea este precedată de redistribuiri de eforturi, având un caracter ductil.

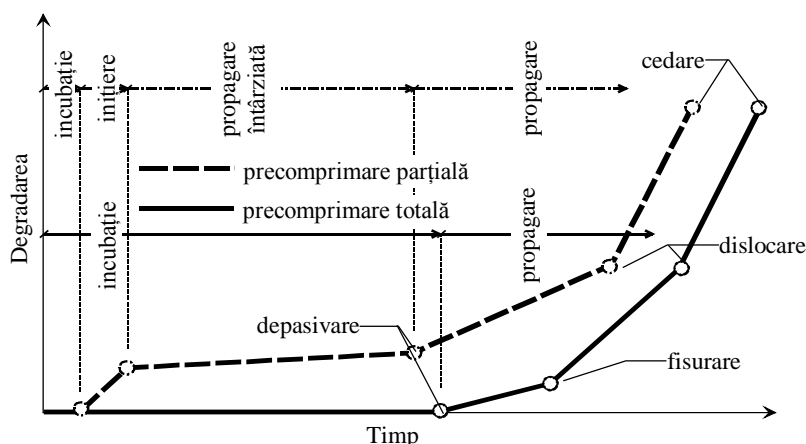


Fig. 2.6 Degradarea prin a elementelor din beton precomprimat

2.5 Degradarea prin îmbătrânire

În exploatare, structurile din beton armat sunt expuse la un regim de solicitare mult diferit de cel modelat prin metodele curente de proiectare. Practic, o structură este solicitată permanentă la un regim de sarcini variabil, chiar dacă evoluția acestuia este insesizabilă pentru un raportor static. Astfel, în elementele structurale au loc în permanentă deplasări mici și oscilații variabile ca extindere și cu amplitudini foarte mici.

Studii recente ale „tribologiei”, știința frecării, au înlocuit termenul de frecare cu alte două noțiuni: „deplasări mici” și „oboseala indusă de deplasările mici”. Ele pun în evidență apariția la suprafața de contact dintre două corpuri animate de mici deplasări (de ordinul micronilor), a unui al „treilea corp”. Acest corp intermediar este responsabil pentru comportamentul particular al acestui tip de contact (figura 2.7).

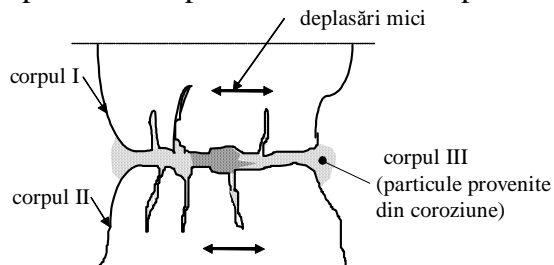


Fig. 2.7 Contactul intim între două corpuri

Plecând de la aceste observații, rezultă că într-un element de beton precomprimat apare un proces de degradare cu o evoluție foarte lentă în timp, dar care se manifestă în principal în sistemul de pretensionare (contacte de tipul metal-metal),

între componentele acestuia și beton sau teți de protecție, dar chiar și în masa betonului propriu-zis. În asociere și cu o serie de fenomene chimice (interne) sau fizice (expunere la precipitații, variații de temperatură, abraziune etc.) se înregistrează un proces de îmbătrânire, proprietățile mecanice ale materialelor reducându-se și în final elementul pierzându-și nivelul de siguranță și capacitatea portantă. Durata acestui proces se raportează în principal calității inițiale a materialelor și compoziției lor, dar și regimului de solicitare.

În prezent se depun eforturi mari în cercetarea privind durabilitatea structurilor, existând deja rezultate încurajatoare cu privire la predicția acestuia prin metode curente de proiectare.

2.6 Degradarea prin oboseală

Apariția fenomenului de oboseală dinamică a betonului este dependentă în primul rând de amplitudinea oscilațiilor acțiunilor. Pentru un efort minim σ_{bmin} , rezistența la oboseală după 2×10^6 cicluri σ_{bmax} , în funcție de efortul unitar mediu $\sigma_{bm} = 1/2(\sigma_{bmin} + \sigma_{bmax})$ este reprezentată în figura 2.. Analizând această diagramă se observă că rezistența la oboseală prin compresiune pentru $\sigma_{bmin} = 0$ reprezintă $0.6R_c$. Dacă $\sigma_{bmin} = 0.5R_c$, domeniul încărcărilor oscilante reprezintă $0.3R_c$. Raporturile se mențin și în cazul rezistenței la întindere.

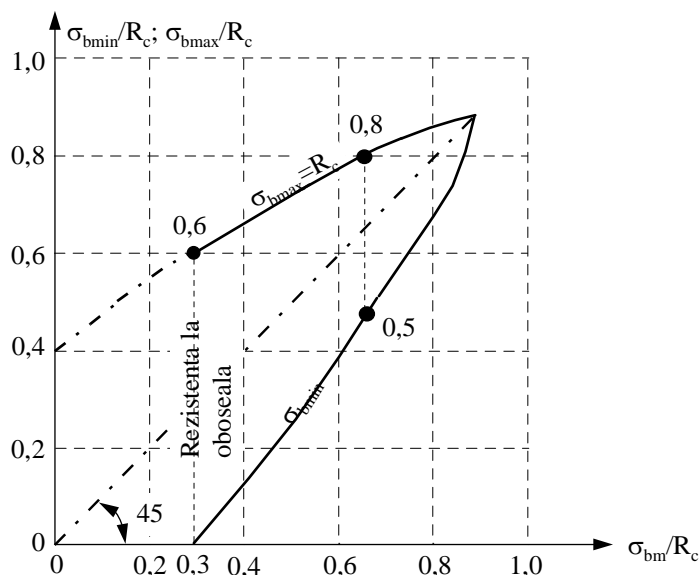


Fig. 2.8 Rezistența la oboseală a betonului

În general, fenomenul de oboseală a sistemului de pretensionare este puțin probabil să se manifeste cu ponderi importante la elementele din beton precomprimat cu deschideri mari. La aceste structuri ansamblul încărcărilor variabile este mult mai mic decât ansamblul încărcărilor permanente, astfel încât efectul lor devine mai puțin semnificativ. Totuși, în cabluri pot apare variații ale eforturilor unitare de ordinul zecilor de MPa, variații perfect compatibile cu performanțele ancorajelor și sistemelor de pretensionare.

Rezistența la oboseală în zona de ancorare poate fi asigurată prin filtrarea variațiilor de eforturi cu injecții locale cu rășină în jurul cablului. Astfel, variațiile eforturilor se transmit prin aderență la placa de repartiție înglobată în beton prin intermediul unui ghidaj de ancorare (figura 2.9). Filtrarea, în sensul electronic al cuvântului, este un paleativ care permite prin mobilizarea aderenței unei rășini să

oprească variațiile eforturilor în cablul ce tranzitează zona de ancorare, transmițându-le plăcii de repartiție. Ancorajul este dispozitivul cel mai sensibil la variațiile de eforturi dinamice, iar această metodă permite trecerea directă a acestora de la cablu la structură, fără a trece prin ancoraj.

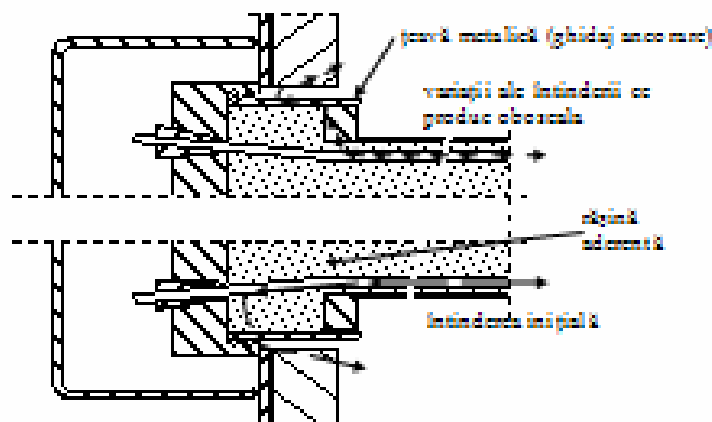


Fig. 2.9 Filtrarea eforturilor ce provoacă apariția oboselii

Pe fondul scăderii proprietăților de rezistență ale materialelor, degradarea prin oboseala indusă este de regulă accelerată datorită ruperii sârmelor unor toroane (care prezintă vicii de execuție), în final elementul pierzându-și capacitatea portantă.

2.7 Degradarea la foc

În prezența focului, betonul expus se degradează prin exfoliere și despicare datorită temperaturii excesive. La exfolierea betonului cauzată de foc, armătura poate să fie descoperită și datorită supraîncălzirii va pierde din rezistență și elasticitate. Despicarea poate să apară când umezeala din interiorul betonului expandează și produce fisurarea și dislocarea unor bucăți de beton. De asemenea, despicarea poate să apară datorită dilatării termice a suprafeței exterioare de contact comprimat, ca de exemplu la stâlpi, pereți sau elemente structurale precomprimate.

Efectul temperaturii ridicate asupra rezistenței betonului este mică și neregulată sub 250 °C, dar peste 300 °C se pot pune în evidență pierderi de rezistență măsurabile. Betonul supraîncălzit datorită unui incendiu al clădirii suferă o pierdere a rezistenței la compresiune care continuă să scadă și în cursul răcirii. Dacă temperatura nu depășește 300 °C, în mare măsură rezistența se restabilește. Betonul încălzit la temperatură sub 500 °C se rehidratează în cursul răcirii și treptat redobândește cea mai mare parte a rezistenței inițiale, după aproximativ fiind recuperată circa 90%.

În cazul în care efectul temperaturii este de scurtă durată, va avea loc o revenire înceată. Pierderea de rezistență la temperatură ridicată este mai mare la betonul umed (saturat cu apă) decât în betonul uscat, de aici rezultă că conținutul de apă (umezeală) a betonului este cel mai important factor de influență în comportarea structurii la temperaturi înalte.

Amestecurile mai slabe suferă o pierdere de rezistență relativ mai mică față de amestecurile mai puternice. Temperatura de 400 °C constituie o limită superioară pentru betoane, deoarece betonul supraîncălzit pe o durată semnificativă se va deteriora în timpul răcirii care urmează în aer liber.

Este mai ușor de apreciat că orice oțel expus încălzirii va începe să prezinte o reducere de rezistență de la temperatura de 300 °C. În cazul în care armăturile profilate la cald au fost expuse o perioadă lungă la temperatura de peste 600°C datorită unei prematuri exfolieri a betonului de acoperire, posibilitatea unei reduceri

constante de rezistență este mică. Armăturile formate la rece încălzite peste 400°C vor pierde o proporție cuantificabilă de rezistență din cea obținută prin formarea la rece.

Oțelurile din betonul precomprimat vor pierde aproximativ 20 % din rezistență la 300°C și nu revin la rezistența lor inițială în timpul răcirii.

Sub acțiunea focului partea inferioară a elementului expusă la foc se dilată mai mult decât partea superioară rezultând o curbare a elementului. Rezistența la întindere a betonului și a armăturii din partea inferioară a secțiunii, expusă la foc, scade odată cu creșterea temperaturii. Atunci când rezistența oțelului sub efectul temperaturii ridicate scade până la valoarea efortului din armătură indusă de încărcări exterioare, se produce cedarea din încovoiere.

În baza celor prezentate se poate menționa că rezistența la foc a unui element de precomprimat depinde de intensitatea solicitării, nivelul de siguranță și de curba caracteristică a rezistenței – temperatura oțelului.

La rândul lui, timpul (durata) până la atingerea temperaturii critice depinde și de protejarea armăturii împotriva focului. De regulă protecția armăturii o constituie stratul de beton de acoperire, adică stratul de beton de la suprafața expusă focului până la armătură.

3 DURABILITATEA ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR DE BETON PRECOMPRIMAT

3.1 Noțiuni introductive

Durabilitatea unui element sau a unei structuri de beton precomprimat se definește ca fiind proprietatea acestuia de a-și menține performanța tehnică necesară în timp, sub influența unui ansamblu de acțiuni previzibile. Prin proiectare, construcție și lucrările curente de întreținere, elementul de beton precomprimat va satisface criteriile esențiale pentru o perioadă de exploatare rezonabilă din punct de vedere economic.

Durabilitatea unui element de beton precomprimat se referă la perioada de timp pentru care valorile caracteristice ale materialelor puse în operă sunt asigurate, sub un proces natural de evoluție a caracteristicilor sale în timp. Clasificarea elementelor și a structurilor din punctul de vedere al durabilității este prezentată în tabelul 3.1.

Tab. 3.1 Clasificarea elementelor de beton precomprimat în raport cu durabilitatea

| Durata de exploatare prognozată a construcției (ani) | | Durata de exploatare prognozată a elementului (ani) | | |
|--|-----|---|---------------------------------|--------------------------------------|
| Categoria | Ani | Categoria elementului | | |
| | | Ușor de reparat sau înlocuit | Posibil de reparat sau înlocuit | Cu durata de exploatare a structurii |
| Scurtă | 10 | ≤10 | 10 | 10 |
| Medie | 25 | ≤10 | 25 | 25 |
| Normală | 50 | ≤10 | 25 | 50 |
| Lungă | 100 | ≤10 | 25 | 100 |

3.2 Modele analitice

Așa cum se prezintă în figura 3.1, durabilitatea elementelor de beton armat și precomprimat se raportează factorilor de risc (corespunzători agresivității mediului de exploatare) și măsurilor de protecție. În activitatea curentă, măsurile de protecție se impun în primul rând proprietăților ale betonului și mărimii stratului de acoperire cu beton a armăturii. Cazurile de excepție, cum sunt utilizarea armăturilor din oțel inoxidabil (realizările cu oțel galvanizat sau îmbrăcat într-o matrice de rășină epoxi sau soldat cu eșecuri potrivit ultimelor raportări) fac obiectul unor lucrări de tip unicat, al căror buget permite rezolvări tehnice care nu pot fi încadrate în practica curentă.

După cum se observă în figura 3.1, pentru un element de beton armat și precomprimat durabilitatea (noțiune asociată duratei de exploatare și prognozată încă din faza de proiectare) se raportează proprietăților betonului care caracterizează comportarea sa în contact cu gaze sau lichide agresive din punct de vedere chimic,

precum și stratului de acoperire cu beton atât a armăturii active cât și pasive. În cazul elementelor cu armătură postîntinsă mai intervin și calitatea tecii (care de regulă este din polietilenă de înaltă densitate) și a substanței de protecție injectată în tubulatură (de regulă pastă de ciment, sau mai nou substanțe vâscoase ca și ceara și grăsimea petrolieră).

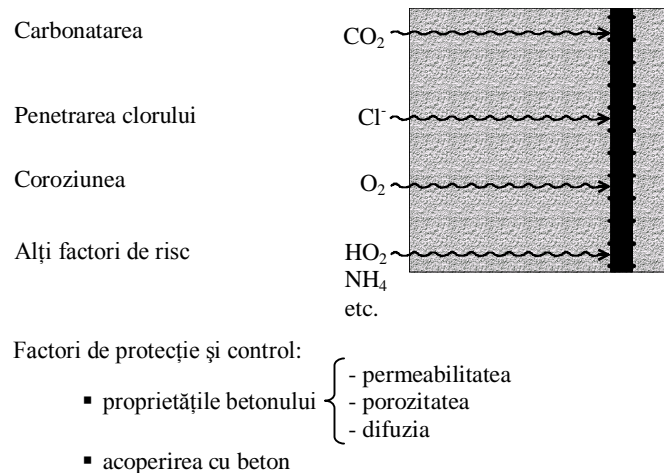


Fig. 3.1 Factori de risc și controlul degradării structurilor de beton precomprimat

Filozofia de proiectare propusă de codurile moderne de practică, cum sunt și Eurocodurile, constă în elaborarea de proceduri de proiectare convenționale pentru siguranța și exploatarea structurilor în funcție de diverse stări limită. Aceste stări limită sunt definite ca fiind domeniul care separă o stare adversă (de exemplu cedarea, flambajul etc.) de o stare dorită. Astfel, o stare limită se definește sub forma:

$$R - S = R(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) - S(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = 0 \quad (3.1)$$

în care

R - funcția care descrie comportarea structurii asociată stării limită analizate (de exemplu la starea limită de rezistență această funcție descrie capacitatea portantă a structurii);

S - funcția care descrie influența încărcărilor asupra structurii;

α_i – parametrii variabili ai funcțiilor R și S.

Procedurile de proiectare însă, sunt astfel concepute încât probabilitatea de depășire a stării limită și trecere în starea adversă de comportare este restricționată:

$$\mathcal{P}\{(R - S) < 0\} < \mathcal{P}_{\max} = \Phi(\beta) \quad (3.2)$$

unde

$\mathcal{P}\{(R - S) < 0\}$ – probabilitatea depășirii stării limită;

\mathcal{P}_{\max} – valoarea maximă acceptată pentru probabilitatea de atingere a stării limită;

Φ - funcția standard de distribuție normală;

β - indicele de siguranță, a cărui valoare se raportează probabilității de neatingere a stării limită (1-P).

Traducerea acestei filozofii în practica curentă de proiectare în condițiile stărilor limită ultime a fost redusă la nivel semiprobabilistic prin introducerea valorilor de referință ale proprietăților materialelor și ale acțiunilor (valori caracteristice și normate), respectiv prin introducerea factorilor parțiali de siguranță etalonați în raport cu probabilitatea maximă \mathcal{P}_{\max} acceptată pentru producerea

colapsului:

$$R_r/\gamma_M - S_r/\gamma_I = R_c - S_c > 0 \quad (3.3)$$

în care

R_r – nivelul de referință al capacității portante a structurii calculată cu valorile caracteristice ale proprietăților materialelor;

S_r – funcția care descrie nivelul de referință al influenței încărcărilor normate asupra structurii;

γ_M – coeficientul parțial de siguranță al materialelor;

γ_I – coeficientul parțial de siguranță al încărcării;

R_c – valoarea de calcul a capacității portante a structurii;

S_c – valoarea de calcul a încărcării.

Dacă până în prezent durabilitatea elementelor s-a stabilit în baza unor experimente și relații empirice (predicții care adeseori s-au dovedit eronate), în ultimii 5 ani au început să se pună la punct modele analitice a căror variabile se află în plin proces de etalonare. Penetrarea și transportul agenților (gaze) chimici agresivi în masa unui element de beton precomprimat sunt guvernate de legea a doua a difuziei elaborată de Fick. Literatura de specialitate publică numeroase moduri de rezolvare a acesteia, cercetările efectuate la INCERC filiala Cluj-Napoca până în prezent în cadrul proiectului, oprindu-se la modelul analitic:

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{Erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (3.4)$$

unde

C_0 - concentrația agentului agresiv la suprafața elementului (% din masa betonului);

$C(x,t)$ - concentrația agentului agresiv după un interval de expunere t la adâncimea x în masa betonului (% din masa betonului);

D_c - factorul de difuzie al agentului agresiv în masa betonului (mm^2/s);

$\operatorname{Erf}(z)$ – o funcție de eroare.

Etalonarea variabilelor din relația (3.4) în raport cu datele obținute experimental în medii cu clor dă bune rezultate pentru funcția de eroare propusă de Crank

$$\operatorname{Erf}(y) = 1 - \left(1 + 0.278393y + 0.230389y^2 + 0.000972y^3 + 0.078108y^4 \right)^{-4} \quad (3.5)$$

Datele experimentale pun în evidență valori ale factorului de difuzie D_c de 10^{-6} - $5.0 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$. Takewaka și Mastumoto prezintă o relație bine argumentată pentru variația în timp a factorului de difuzie, compatibilă cu datele experimentale:

$$D_c(t) = D_{c0} D_1 t^{-1/10} \quad (3.6)$$

unde

D_{c0} – factorul de difuzie raportat raportului a/c ;

D_1 – constantă având valoarea egală pentru betonul confecționat din beton Portland obișnuit;

t – durata de expunere a elementului.

Privind etalonarea factorului de difuzie D_{c0} , există propuneri doar privind transportul ionilor de clor. Aceste expresii sunt însă empirice și nu au încă un caracter de universalitate. Pentru alte gaze nu există deocamdată rezultate publicate.

În ce privește concentrația critică a agenților agresivi în beton, de asemenea doar în cazul ionilor de clor se acceptă valoarea $C_{cr}=0.05$ % (din masa betonului). Pentru $C(x,t) > C_{cr}$ sunt create condițiile de apariție a coroziunii armăturii.

Un model simplu de surprindere a degradării armăturilor este propus de colectivul condus de Iwanami:

$$f_{a(p)c} = f_{a(p)c0} (1 - 0.0132 \Delta A_{a(p)}) \quad \text{N/mm}^2 \quad (3.7)$$

$$E_s = E_{s0} \frac{1 - 0.0113 \Delta A_s}{1 - 0.01 \Delta A_s} \quad \text{N/mm}^2 \quad (3.8)$$

unde

$f_{a(p)c}$, $f_{a(p)c0}$ este rezistența de curgere ale armăturii (active sau pasive) după și înainte de corodare;

$\Delta A_{a(p)}$ este pierderea de secțiune transversală a armăturii exprimată în %;

$E_{a(p)c}$, $E_{a(p)c0}$ este modulul de elasticitate al armăturii (active sau pasive) după și înainte de corodare.

Acest model este simplu și foarte convenabil de utilizat, însă pentru stabilirea $\Delta A_{a(p)}$ sunt necesare determinări efectuate in situ.

Umiditatea betonului poate fi apreciată cu izotermele de adsorbție lui Roelfstra:

$$w(T, H) = a_1 + a_2 T + a_3 H + a_4 TH + a_5 H^2 + a_6 TH^2 \quad (3.9)$$

în care

w – umiditatea betonului (kg/m^3);

T – temperatura (în grade Kelvin);

H – umiditatea porilor macroscopici (mărimă adimensională);

a_1 - a_6 – coeficienți etalonați în raport cu raportul a/c , conținutul de ciment și gradul de deshidratare.

Coeficienții ecuației (3.9) pentru $a/c=0.6$, conținutul de ciment 320 kg/m^3 și un grad de deshidratare de 0.95 sunt prezentați în tabelul 3.2 (etalonați de Meijers și colectivul).

Tab. 3.2 Valori ale coeficienților de constitutivi de transport a umidității în beton

| Coeficientul | Valoarea | |
|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | 0.35<H<0.85 | 0.85≤H≤1.00 |
| a_1 | 38.1 kg/m^3 | $4.48 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ |
| a_2 | 0 $\text{kg/m}^3\text{K}$ | -12.2 $\text{kg/m}^3\text{K}$ |
| a_3 | $1.59 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ | $-8.90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ |
| a_4 | -5.25 $\text{kg/m}^3\text{K}$ | 23.6 $\text{kg/m}^3\text{K}$ |
| a_5 | $-1.38 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ | $4.83 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ |
| a_6 | 4.77 $\text{kg/m}^3\text{K}$ | -12.3 $\text{kg/m}^3\text{K}$ |

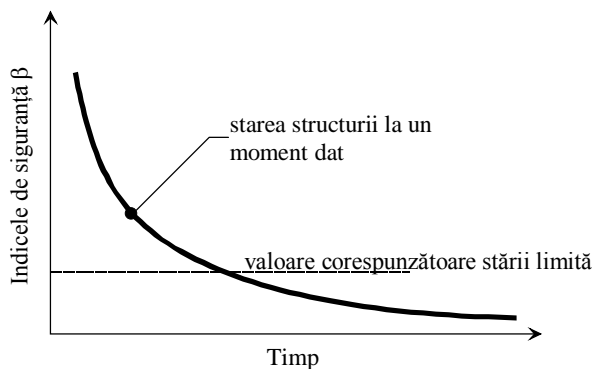


Fig. 3.2 Variația în timp a indicelui de siguranță (β)

Calculul relativ exact al durabilității se poate efectua doar prin măsurări directe ale variabilelor modelelor prezentate mai sus, în baza modelului simplificat de degradare Tuutti prezentat în figura 3.3.

Prevederile EC 2 pentru verificările la stările limită sunt fundamentate în baza unui indice de siguranță (vezi figura 3.2) $\beta = 1.5-1.8$, corespunzătoare unei probabilități de depășire a parametrii controlați de 6.7-3.6 %. Controlul duratei de exploatare se intenționează astfel a se controla indirect, prin corecții ale coeficienților parțiali de siguranță ai ecuației (3.3) în raport cu valori superioare ale β .

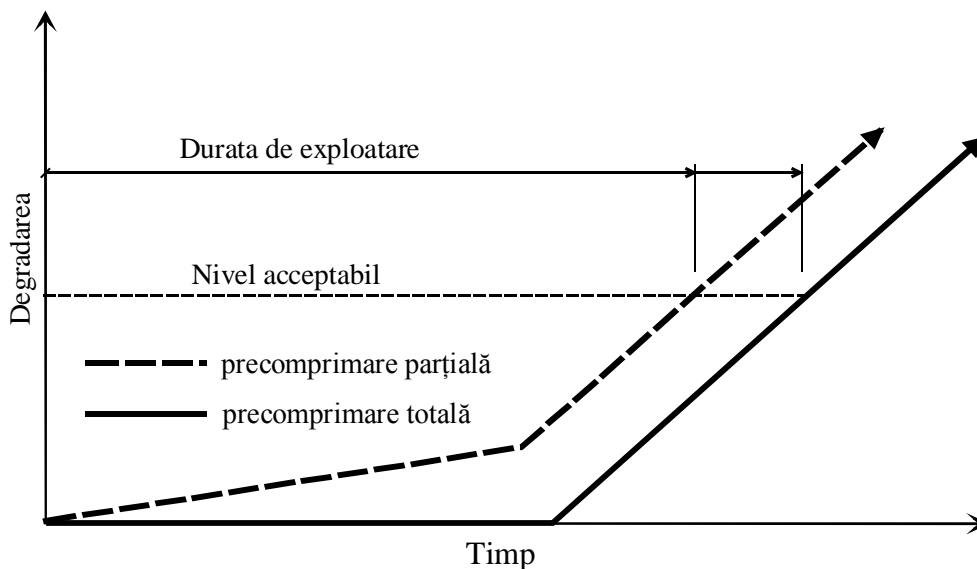


Fig. 3.3 Modelul de degradare Tuutti (1982) - fundamentul proiectării duratei de exploatare

3.3 Principiile de bază ale proiectării

Normele europene conțin principiile de bază ale proiectării structurilor din beton armat și precomprimat, realizate din beton cu agregate cu densitate normală sau cu agregate ușoare. În majoritatea situațiilor precomprimarea este destinată să aibă un efect favorabil.

De aceea pentru verificarea în stare limită ultimă coeficientul parțial de siguranță pentru precomprimare se consideră cu valoarea $\gamma_{P,fav} = 1.0$ la verificarea în stare limită de stabilitate, în cazul precomprimării externe, atunci când o sporire a precomprimării poate avea efect defavorabil, se va utiliza un coeficient parțial de siguranță $\gamma_{P,defav} = 1.3$. De asemenea, la verificarea efectelor locale se va utiliza un coeficient $\gamma_{P,defav} = 1.2$.

Durabilitate unei structuri se asigură prin satisfacerea cerințelor de funcționalitate, rezistență și stabilitate de-a lungul duratei sale de utilitate sau cheltuieli excesive neprevăzute de întreținere.

Normele EN 206 stabilesc clasele de expunere a structurilor în funcție de condițiile ambientale. Acestea sunt:

- XO – când nu există riscul de coroziune sau atac
- XC1, XC2, XC3, XC4 – coroziune indusă prin carbonatare
- X1, XD2, XD3 – coroziune indusă de cloruri
- XS1, XS2, XS3 – coroziune indusă de cloruri din apă de mare
- XF1, XF2, XF3, XF4 – atacul îngheț-dezghețului
- Xa1, Xa2, Xa3 – atacul chimic.

Tab. 3.3 Clasele indicatoare de rezistență

| Clasele de expunere | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------------|-------------|--------|---|--------|-----|
| Coroziunea | | | | | | | | | | |
| | Coroziunea indusă de carbonatare | | | | Coroziune indusă de cloruri | | | Coroziune indusă de cloruri din apă de mare | | |
| | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XD1 | XD2 | XD3 | XS1 | XS2 | XS3 |
| Clasa indicatoare de rezistență | C20/25 | C25/30 | C30/37 | | C30/37 | | C35/45 | C30/37 | C35/45 | |
| Deteriorarea betonului | | | | | | | | | | |
| | Fără risc | | Atacul îngheț-dezghet | | | Atac chimic | | | | |
| | XO | | XF1 | XF2 | XF3 | XA1 | XA2 | XA3 | | |
| Clasa indicatoare de rezistență | C12/15 | | C30/37 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | | | C35/45 | |

Proiectarea la durabilitate constă în alegerea clasei betonului, cu ajutorul tabelului 3.2 și a stratului de acoperire cu beton a armăturii, definit ca distanță dintre suprafața armăturii (incluzând etrierii și armătura de suprafață) și cea mai apropiată suprafață de beton.

Stratul normal de acoperire (c_{nom}) se compune din stratul minim (c_{min}) și toleranța admisă în proiectare:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{tot} \quad (3.10)$$

unde c_{min} se prevede pentru a asigura:

- transmiterea sigură a forțelor de aderență;
- protecția oțelului împotriva coroziunii;
- asigurarea rezistenței adecvate la foc.

La proiectare trebuie să se folosească valoarea cea mai mare pentru c_{min} unde să satisfacă ambele cerințe pentru aderență și condițiile de mediu:

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,Y} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm} \} \quad (3.11)$$

unde:

$c_{min,b}$ – stratul de acoperire din cerințele de aderență

$c_{min,dur}$ – idem din condiții de mediu

$\Delta c_{dur,Y}$ - element aditiv de siguranță

$\Delta c_{dur,st}$ – reducere a stratului minim pentru utilizarea oțelului inoxidabil

$\Delta c_{dur,add}$ – idem pentru utilizarea protecției adiționale

Valoarea $c_{min,b}$ în cazul canalelor circulare pentru tendoane aderente este egală cu diametrul canalului. Pentru canalele rectangulare a armăturilor postîntinse $c_{min,b}$ se ia cea mai mare dintre dimensionarea minimă sau jumătate din dimensiunea mai mare. În cazul tendoanelor preîntinse $c_{min,b}$ se ia dublul diametrului toronului sau sârmei, respective triplul diametrului sârmelor amprențate.

Valoarea $c_{min,dur}$ este dată în tabelul 3.4. Clasa minimă recomandată a structurii este 1.

Valoarea recomandată pentru toleranță este $\Delta c_{tot} = 10 \text{ mm}$. Acolo unde procesul de fabricație este supus unui sistem de asigurare a calității, în care monitorizarea include măsurarea stratului de acoperire, Δc_{tot} se poate reduce la $10 \geq \Delta c_{tot} \geq 5 \text{ mm}$. Dacă se utilizează dispozitive de măsură foarte sensibile pentru monitorizare și elementele cu neconformități sunt eliminate (de exemplu la elementele prefabricate) Δc_{tot} se poate reduce la $10 \text{ mm} \geq \Delta c_{tot} \geq 0 \text{ mm}$.

Tab. 3.4 Valorile $c_{min,dur}$ pentru oțel pretensionat

| Cerințe ambientale pentru c_{min} (mm) | | | | | | | |
|--|-------------------|-----|---------|-----|---------|---------|---------|
| Clasa structurii | Clasa de expunere | | | | | | |
| | XO | XC1 | XC2/XC3 | XC4 | XD1/XS2 | XD2/XS2 | XD3/XS3 |
| 1 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 2 | 10 | 15 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 3 | 10 | 20 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 4 | 10 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| 5 | 15 | 30 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 6 | 20 | 35 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |

3.4 Procedee moderne de reabilitare

Implementarea metodelor moderne de reabilitare a elementelor de beton precomprimat se face încă din faza de proiectare, prin prevederea sistemelor neaderente de pretensionare, care permit înlocuirea totală sau parțială a unităților de armătură activă. În plus, se pot prevedea teci pentru trasee suplimentare de armătură, în care să se introducă armături active pe durata exploatării structurii.

Alte metode de reabilitare tratate sunt consolidarea prin pretensionare exterioară (figura 3.4) și consolidarea cu armături compozite din fibre de carbon, sticlă și mase plastice (figura 3.5).

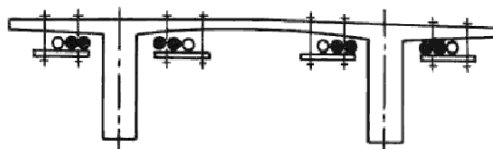


Fig. 3.4 Consolidarea prin pretensionare exterioară

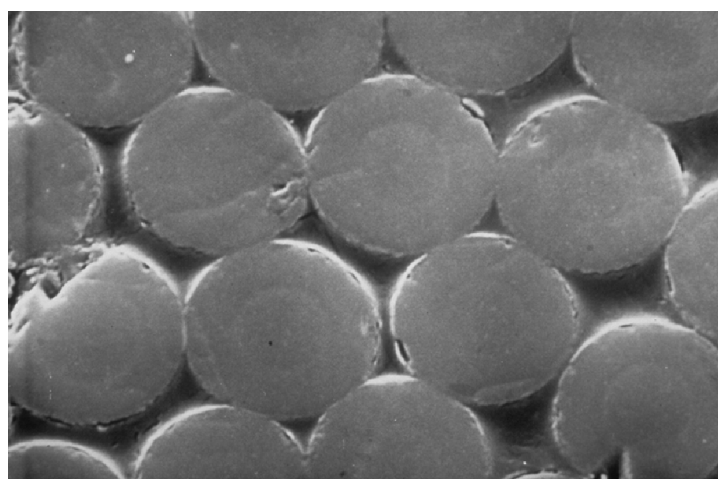


Fig. 3.5 Secțiune printr-o armătură compozită

3.4.1 Consolidarea prin pretensionare exterioară

Această metodă de consolidare face obiectul unui ghid (indicativ GP 080-03) avândul ca autor pe responsabilul prezentului proiect. Toate detaliile cu privire la această metodă se găsesc în această reglementare.

3.4.2 Consolidarea cu armături compozite din fibre de carbon

Ipozeze de calcul care se admit la elementele consolidate sunt:

- calculul se face pe dimensiunile reale ale elementului consolidat, armătura existentă și proprietățile reziduale ale materialelor;
- ipoteza secțiunilor plane;
- nu există alunecări relative între armătura din fibre de carbon și beton;
- deformația din forfecare a adezivului este neglijabilă;
- deformația limită a betonului comprimat se consideră 3 ‰;
- rezistența betonului la întindere este neglijabilă;
- armătura din fibre de carbon se comportă elastic până la cedare.

Trebuie corelată capacitatea portantă la forță tăietoare a elementului încovoiat consolidat cu capacitatea portantă la încovoiere. Dacă la momentul efectuării lucrărilor de consolidare nu sunt îndepărtate toate acțiunile care acționează asupra elementului (inclusiv greutatea proprie și starea de precomprimare), acestea se vor considera ca și stări de eforturi și deformații inițiale.

Moduri de cedare la încovoiere ale unui element consolidat sunt:

- cedarea betonului comprimat înainte de curgerea armăturii din oțel;
- curgerea armăturii din oțelului urmată de cedarea armăturii din fibre de carbon;
- curgerea armăturii din oțel urmată de cedarea betonului comprimat;
- delaminarea prin forfecare/întindere a stratului de acoperire cu beton;
- pierderea aderenței între armătura din fibre de carbon și beton.

Pentru prevenirea pierderii aderenței între armătura din fibre de carbon și beton se limitează deformația în armătura compozită prin multiplicarea deformației ultime cu un coeficient de aderență:

$$K_a = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000} \right) \leq 0.90 & \text{pentru } nE_f t_f \leq 180,000 \text{ N/mm} \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & \text{pentru } nE_f t_f > 180,000 \text{ N/mm} \end{cases} \quad (3.12)$$

unde

- n – numărul de straturi de armătură compozită;
- t_f – grosimea în mm a unui strat de armătură compozită;
- E_f – modulul de elasticitate al armăturii compozite.

La cedare, deformația limită în armătura din fibre de carbon trebuie asociată deformației limită a betonului comprimat (vezi figura 3.6):

$$\varepsilon_{fl} = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_{bi} \leq K_a \varepsilon_{fu} \quad (3.13)$$

unde

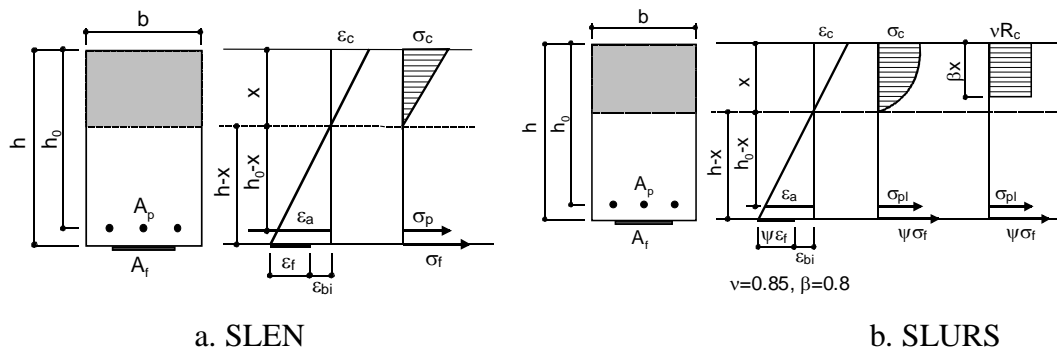


Fig. 3.6 Ipoteze de calcul a elementelor consolidate cu fibre de carbon

- h – înălțimea elementului;
- x – înălțimea zonei comprimate la cedare;
- ε_{cu} – deformația la cedare a betonului comprimat;
- ε_{bi} – deformația unitară inițială a betonului.

Aplicarea externă a armăturilor din fibre de carbon reduce ductilitatea inițială a elementelor de beton armat, deși uneori pierderea de ductilitate este nesemnificativă. Pentru a păstra un grad de ductilitate suficient, trebuie verificat nivelul deformațiilor secționale la cedare în condițiile SLURS. Se consideră că o ductilitate secțională adecvată se atinge dacă deformația în armătura pasivă de oțel întinsă atinge 5 ‰. Filozofia de abordare în proiectare constă în realizarea unei rezerve de rezistență mai mari la secțiunile casante, prin aplicarea unui factor de reducere a capacității portante

$$\Phi = \begin{cases} 0.90 & \text{pentru } \varepsilon_a \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_a - \varepsilon_{ac})}{0.005 - \varepsilon_{ac}} & \text{pentru } \varepsilon_{ac} < \varepsilon_a < 0.005 \\ 0.70 & \text{pentru } \varepsilon_a \leq \varepsilon_{ac} \end{cases} \quad (3.14)$$

unde

- ε_a – deformația unitară în armătura pasivă de oțel la SLURS;
- ε_{ac} – deformația unitară la curgere în armătura pasivă de oțel.

În condițiile Stărilor Limită ale Exploatării Normale armătura pasivă din oțel în elementul consolidat nu trebuie să intre în curgere sub nivelul sarcinilor de exploatare.

În condițiile Stărilor Limită Ultime de Rezistență și Stabilitate se aplică un factor adițional efortului unitar din armătura din fibre de carbon $\psi=0.85$, care introduce efectul pierderii de aderență la momentul cedării (vezi figura 3.6.b).

4 MONITORIZAREA STRUCTURILOR DE BETON PRECOMPRIMAT

Monitorizarea comportării structurale are un rol esențial pentru asigurarea durabilității construcțiilor. Decizia de a supune o structură unei monitorizări programate trebuie luată de proprietarul și/sau administratorul construcției încă din momentul elaborării documentației preliminare, astfel încât activitatea de concepție, proiectare și planificare a execuției să se coreleze cu programul de monitorizare în vederea asigurării durabilității prognozate (figura 4.1).

Starea tehnică a unui element sau a unui ansamblu structural de beton precomprimat sintetizează un pachet de condiționări logice cuantificate prin procesarea informațiilor furnizate de observații vizuale, măsurători și încercări efectuate in situ sau laborator, în baza unor modele de degradare asociate unor riscuri asumate rezultate din prelucrări statistice. Astfel, la un moment dat, starea tehnică pune în evidență starea de degradare structurală cauzată de coroziunea armăturii, calitatea slabă sau deteriorarea betonului, defecțiuni sau degradări ale sistemelor de pretensionare, identificate și cuantificate periodic prin inspecții tehnice, fiind implicit o măsură a durabilității elementului și ansamblului structural.

4.1 Programul de monitorizare

Frecvența verificărilor, natura și conținutul lor, trebuie prevăzute în caietul de sarcini întocmit de proiectant, acestea putând fi ajustate în urma constatărilor și concluziilor inspecțiilor. Inspecțiile tehnice trebuie să se efectueze începând cu perioada testelor finale dinaintea exploatării unei structuri, frecvența și tipul lor raportându-se la specificul structurii, sistemul de pretensionare, condițiile și regimul de exploatare, respectiv durata de exploatare proiectată.

Inspecțiile curente se realizează prin examinări vizuale și tehnici tradiționale de testare a stării materialelor, având o frecvență semestrială sau anuală. Inspecțiile speciale, complementare celor curente, se materializează într-o verificare aprofundată a structurii prin măsurători, investigații și încercări nedistructive și/sau semidistructive. Acestea se efectuează de regulă la 1, 3 și 5 ani de la punerea în exploatare, iar în continuare din 5 în 5 ani, până la expirarea duratei de exploatare a construcției. Ori de câte ori o construcție este subiectul unor acțiuni speciale sau accidentale, trebuie efectuată o inspecție curentă și/sau specială.

Raportul de inspecție trebuie să cuprindă ansamblul observațiilor specifice pentru fiecare operațiune executată (examinări, măsurători, analize, expertize, încercări mecanice, etc.) și fundamentarea acestora prin rapoarte de încercări, buletine de analiză, fotografii, etc. De asemenea, trebuie să prezinte o apreciere a comportamentului structural și a nivelului de siguranță. Această apreciere trebuie să se bazeze pe specificațiile constructive și în special pe capitoul calității, care trebuie să conțină istoria fiecărui grup de elemente, anomaliile, acțiunile corective, care se constituie în imaginea reală a construcției și stării sale tehnice. Plecând de la acest

document, proprietarii și/sau administratorii construcției pot decide (figura 4.1):

- menținerea structurii în starea din perioada inspecției și efectuarea lucrărilor de întreținere după planificarea existentă;
- efectuarea de investigații suplimentare și execuția de reparații sau lucrări de reabilitare.

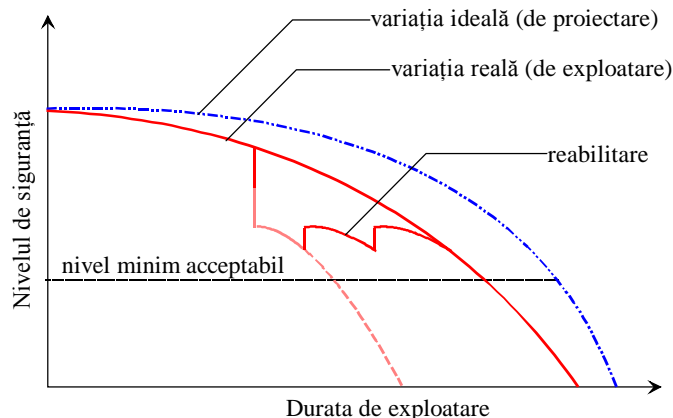


Fig. 4.1 Asigurarea durabilității prin controlul nivelului de siguranță

4.2 Verificări în cadrul inspecțiilor tehnice

În cazul structurilor de beton precomprimit, verificările efectuate trebuie să aibă în vedere următorii factori aflați în interdependență:

- aspectului și calitatea betonului;
- starea sistemului de pretensionare;
- starea de deformații și deplasări.

Verificarea aspectului și calității betonului este foarte importantă deoarece, acesta furnizează informații și cu privire la starea armăturilor înglobate în masa sa, fie ele active sau pasive. Prin examinare vizuală se găsesc și analizează indiciile de suprafață privind eventualele degradări, deprecieri și defecte, atât ca natură cât și ca extindere. În acest sens, trebuie sesizate defectele de suprafață ale fețelor văzute (culoare neuniformă, pete negre, impurități, pete de rugină, aspect prăfuit, imperfecțiuni geometrice, aspect macroporos, agregate mari la suprafață), infiltrațiile, eflorescențele și zonele cu beton segregat, erodat, friabil sau în care agregatele nu sunt înglobate în pasta de ciment. Alte indicii sunt furnizate de straturile delaminate sau exfoliate, fisuri (de contracție sau datorate stării de eforturi) și crăpături. Informații suplimentare pentru investigații aprofundate se pot obține prin extragerea de carote și testarea lor mecanică și/sau chimică, sau prin încercări nedistructive.

Verificarea sistemului de pretensionare, indiferent de tipul acestuia, trebuie să aibă în vedere că toate componentele sale sunt echipamente mecanice care se raportează atât mediului oferit de beton cât și mediului exterior. Aceasta trebuie să se focalizeze pe două direcții principale:

- verificarea traseului armăturii active;
- verificarea zonelor de ancorare și transmitere, respectiv în cazul pretensionării exterioare și a zonelor de deflectare.

Verificarea traseului armăturii active poate fi efectuată direct doar la sistemele de pretensionare exterioară, începând cu un examen vizual. În cazul tendoanelor înglobate, acestea pot fi examinate vizual doar în măsura în care o stare avansată de degradare a betonului permite un contact vizual cu porțiuni ale acestuia, în rest fiind necesară interpretarea indicilor rezultate din verificarea betonului. Sistemele de

pretensionare demontabile oferă posibilitatea unor investigații amănunțite prin detensionarea și expertizarea în detaliu și individuală a toroanelor, cu sau fără înlocuirea lor. Expertizarea în detaliu a acestora presupune:

- examen vizual;
- măsurarea caracteristicilor mecanice;
- constatarea gradului de uzură a sistemului de protecție.

În cazul armăturilor preîntinse, verificarea zonei de transmitere trebuie efectuată cu privire la starea extremității armăturilor active și prezența fisurilor în despicare.

La armăturile postîntinse, zonele de ancorare necesită o verificare atât a zonei de transmitere cât și a zonei de ancorare. În cazul pretensionării exterioare, zona de transmitere este în același timp și o zonă de tranziție, care presupune un mare număr de piese cu rol de accesorii, dar în același timp care au un rol esențial în asigurarea unei comportări corecte a cablului în diversele faze de solicitare (ghidare, amortizare vibrații, etanșezare, etc.). Pentru a fi accesibile verificării, acestea trebuie să fie astfel proiectate încât să fie ușor de montat și demontat fără a fi afectate. În aceste cazuri trebuie acordată o atenție deosebită vopselei anticorozive, a cărei grosime poate afecta dispozitivul, conducând la griparea unui filet, obturarea unei fante, etc. Operațiunea de verificare constă în:

- examen vizual înainte de demontare și după demontare;
- expertizarea anumitor materiale (neopren, mastic, mase plastice).

Verificarea zonei de ancorare constă în:

- examen vizual extern;
- înlăturarea capacului de protecție și examinarea vizuală a ancorajului;
- analiza produsului injectat în ancoraj;
- demontarea și examinarea în detaliu a pieselor ancorajului, în măsura în care este posibil;
- inspectarea fibrelor toroanelor detensionate;
- inspectarea filetelor ce permit reglaje.

Zonele de deflectare se examinează vizual atât din punctul de vedere al geometriei, cât și din punctul de vedere al protecției cablului.

Verificarea prin examinare vizuală și eventual, prin măsurători a stării de deplasări a elementului structural, oferă primele indicii cu privire la eventualele degradări, deprecieri, vicii ascunse sau deficiențe, corelate sau nu cu regimul de exploatare al structurii.

4.3 Metode tradiționale și moderne de încercare nedistructivă

Pe lângă metodele tradiționale (analiza răspunsului acustic, extragerea și încercarea carotelor, metoda indicelui de recul, metoda ultrasonică și metoda semidistructivă) de investigare aplicabile structurilor de beton precomprimat, în ultimii ani au început să se aplice o serie de metode complementare, aflate în diverse etape de perfecționare. O parte din acestea au și un caracter permanent, oferind un control continuu, respectiv o monitorizare permanentă.

4.3.1 Analiza răspunsului acustic

Cea mai veche metoda de localizare a betonului delaminat constă în analiza răspunsurilor acustice datorate unor acțiuni mecanice. În funcție de orientarea și accesibilitatea suprafeței de beton, răspunsul acustic poate fi provocat utilizând un ciocan, sârmă sau lanț. Betonul este lovit cu un ciocan sau sârmă, sau scanat prin

translație cu un lanț, analiza răspunsului acustic furnizând informații primare privind calitatea betonului. Un beton de bună calitate, fără delaminări, produce un răspuns acustic rapid, plin și rotund, în timp ce zonele de beton delaminat produc un sunet de gol.

Un tehnician experimentat poate identifica destul de rapid o zonă de beton delaminat printr-o astfel de metodă. Acestea pot fi marcate direct pe suprafața elementului, sau pot fi puse în evidență pe o schiță, astfel încât să fie localizate și înregistrate pentru comparații ulterioare.

Deoarece metoda este manuală, următorii factori pot influența acuratețea rezultatelor:

- după o anumită perioadă, percepția răspunsului acustic poate fi denaturată la frecvențe înalte;
- oboseala operatorului.

4.3.2 Încercarea în laborator a carotelor

Încercările pe carote se folosesc pentru determinarea unor caracteristici ale betonului din structură. Dintre acestea, se pot enumera:

- rezistența la compresiune;
- rezistența la întindere prin despicare;
- densitatea aparentă;
- porozitatea;
- gradul de impermeabilitate;
- modulul de elasticitate static și dinamic;
- corelația între mărimile obținute prin metodele nedistructive și rezistența la compresiune;
- grosimea stratului de beton degradat de acțiuni fizice (îngheț, foc) sau chimice (acizi, săruri).

Carota, de formă cilindrică este extrasă din elementul structural prin tăiere mecanică. Pentru obținerea rezistenței echivalente celei obținute pe cuburi de probă, se utilizează factori de corecție.

4.3.3 Metoda indicelui de recul

Metoda indicelui de recul este o metodă de determinare a rezistenței la compresiune a betonului dintr-o structură, prin determinarea durității superficiale a acestuia. Aceasta se bazează pe măsurarea reculului unui corp mobil care se aplică dinamic pe suprafața betonului.

Pe baza relațiilor determinate experimental între cele două caracteristici fizice, funcție de o serie de parametri, dintre care principalii țin de compoziția betonului, vârsta acestuia la data încercării și tipul aparatului utilizat, se poate estima rezistența la compresiune a betonului. Precizia metodei este relativ redusă și nu se poate utiliza decât până la vârste mici și medii ale betonului. Metoda este aplicabilă controlului pe faze pentru elementele de beton precomprimat (decofrare, transfer, livrare), până la 60 de zile de la turnare. Metoda nu se recomandă pentru betoane mai vechi de 6 luni și de asemenea celor cu dozaje mici, elementelor prea subțiri sau masive, etc.

4.3.4 Metoda ultrasonică de impuls

Această metodă se bazează pe relația dintre viteza de propagare a ultrasunetelor prin beton și proprietățile mecanice ale acestuia. Metoda poate fi utilizată la determinarea:

- proprietăților elasto-dinamice al betonului;
- defectelor din masa betonului;
- rezistenței la compresiune uniaxială a betonului.

Ca și în cazul metodei precedente, pe baza relațiilor determinate experimental între cele două caracteristici fizice, funcție de aceleași categorii de parametri, se poate estima rezistența la compresiune a betonului.

Metoda are o precizie superioară celui bazate pe indicele de recul și se poate aplica betoanelor indiferent de vârsta acestora. Și această metodă are limitări și contraindicații.

4.3.5 Metoda semidistructivă

Metoda se bazează pe măsurarea forței necesare smulgerii fie a unei plăci de pe suprafața betonului, fie a unei ancore introdusă în beton, fixate cu rășină epoxidică. Funcție de valoarea forței utilizând relații de transformare determinate experimental se obține rezistența la compresiune a betonului.

4.3.6 Radiografierea

Radiografierea presupune utilizarea unei surse puternice de raze X cu particule beta sau gama. Un fascicol de raze penetrează elementul de beton precomprimat și este detectat de cealaltă parte (accesul la ambele fețe ale elementului este obligatoriu), diferența de adsorbție a particulelor radioactive furnizând informații cu privire la proprietățile materialului (figura 4.2).

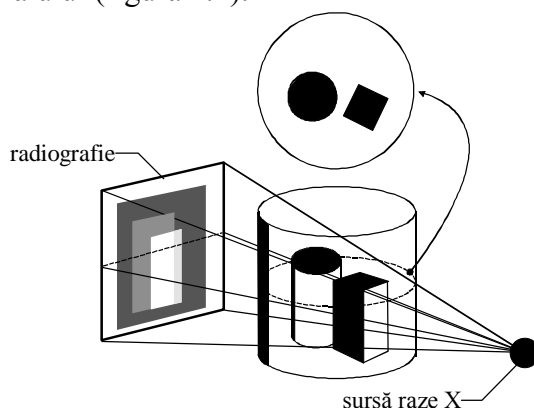


Fig. 4.2 Principiul radiografierii

Zona investigată, cu o grosime maximă de 60 cm poate fi vizualizată prin radiografii (care necesită o expunere a filmului de până la 30 de minute) sau, mai recent, în timp real prin imagini digitale (figura 4.3).



Fig. 4.3 Vizualizarea digitală a elementelor radiografiate

Imaginile bidimensionale pe care le furnizează acest tip de investigație pun în evidență cu ușurință existența golurilor secționale, însă orientarea lor este foarte importantă pentru detecția coroziunii. Astfel, aceasta poate fi pusă în evidență doar pe suprafețe extinse sau unde există pierderi secționale mari.

Aparatura este portabilă, însă utilizarea ei implică o serie de restricții pe durata de emisie a razelor X, pentru a se asigura sănătatea și siguranța personalului.

4.3.7 Tomografierea computerizată

Principiul tomografierii constă în măsurarea atenuării unui fascicul de raze X sau gama care traversează un obiect (figura 4.4). Acesta este parțial absorbit și difuzat în obiectul studiat, restul fascicului fiind transmis pe un traseu liniar la detector. Cantitatea de raze atenuate ale fascicului se raportează numărului atomic al diverselor faze fizice distribuite în obiect, precum și distribuției densității lor. Vizualizarea în 3-D a datelor este de tip digital (figura 4.5), ea fiind realizată prin implementarea unor algoritmi specifici de filtrare discretă a proiecțiilor.

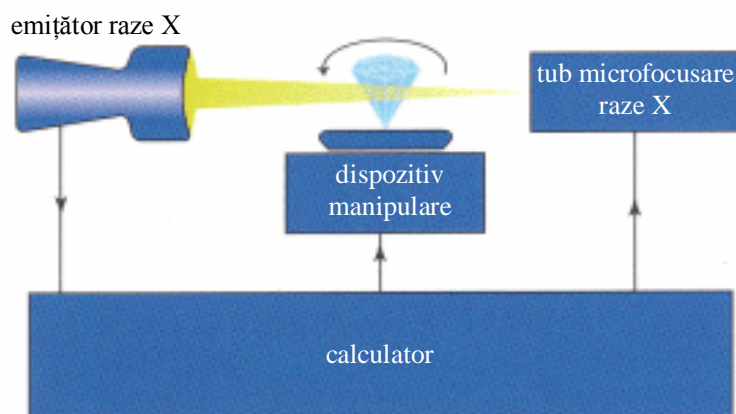
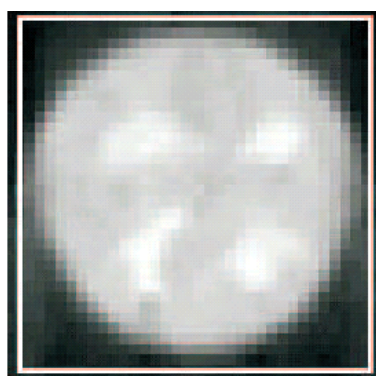
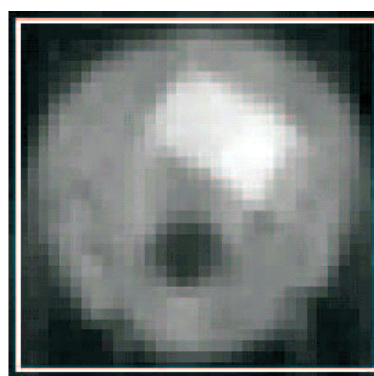


Fig. 4.4 Schema bloc a aparaturii de tomografiere



a. agregate grosiere (pete albe) și piatra de ciment



b. vizualizare gol (pata neagră) și agregat grosier (pata albă)

Fig. 4.5 Imagini digitale obținute pe o epruvetă cilindrică de beton

Și în acest caz este necesar accesul la ambele fețe ale elementului. Tomografierea computerizată nu poate pune în evidență existența microfisurilor în armăturile pretensionate, ci doar pierderi semnificative de secțiune. Se poate aplica cu succes atât la armături înglobate în teci (armături postîntinse) cât și la armături preîntinse. Uneori, interpretarea datelor este dificilă deoarece calitatea rezultatelor

este influențată de variațiile de temperatură și condițiilor meteorologice, care pot afecta proprietățile materialului la suprafață. Pentru ca metoda să poată fi utilizată cu un mai mare succes, aparatura de tomografiere necesită îmbunătățirea performanțelor privind:

- rezoluția imaginilor tridimensionale, care la ora actuală este de maximum un 1 mm și nu face posibilă cuantificarea cu precizie a pierderilor de secțiune a armăturilor corodate;
- rezoluția contrastului imaginii digitale, pentru a permite detectarea materialelor cu densități apropiate;
- creșterea vitezei de achiziție și procesare a datelor, în condițiile creșterii performanțelor imaginilor digitale în conformitate cu punctele de mai sus.

4.3.8 Scanarea electromagnetică de suprafață

Principiul acestei metode constă în cuantificarea reflexiei pulsurilor electromagnetice de înaltă frecvență (1 GHz) la interfețele de contact dintre materiale cu proprietăți electromagnetice diferite, cum sunt armăturile, golurile și tecile. Refracția pulsului electromagnetic continuu este în strânsă legătură cu proprietățile materialului și unghiul de incidență.

Aparatura constă într-o antenă emițătoare și receptoare de pulsuri electromagnetice, cu care se scanează suprafața elementului (figura 4.6).

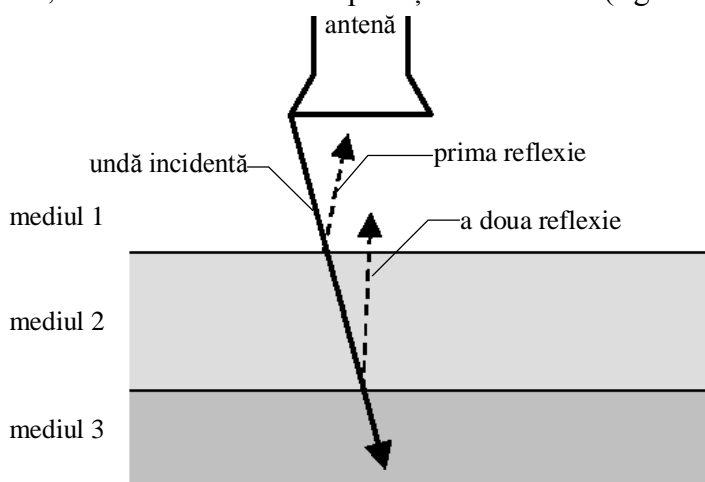


Fig. 4.6 Propagarea undelor electromagnetice prin medii caracterizate de constante dielectrice diferite

Coeficientul de reflexie a undelor electromagnetice la interfața a două materiale (ρ_{12}) este dat de relația:

$$\rho_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (4.1)$$

unde ϵ_{r1} și ϵ_{r2} sunt constantele relative raportate la aer a celor două materiale (vezi tabelul 4.1). Semnalele reflectate și împrăștiate sunt analizate pentru a converti durata în frecvență utilizând transformări prin funcții Fourier, astfel încât este posibilă vizualizarea și interpretarea rezultatelor sub formă grafică. Aparatura este capabilă să localizeze poziția și mărimea armăturilor, tecile și golurile, chiar și să facă distincție între armături active și pasive. Totuși, rezultatele sunt doar calitative, pentru cuantificarea precisă a pierderilor secționale fiind necesare investigații complementare.

Tab. 4.1 Constante dielectrice relative pentru diferite materiale

| Materialul | Constanta dielectrică relativă la 25° C |
|---------------------|---|
| argilă uscată | 2.5 |
| aer | 1.0 |
| beton | 6.0 |
| polistiren expandat | 1.03 |
| apă | 78 |
| oțel | ∞ |

Se pot investiga elemente cu grosimi de până la 1 m, dar există o interdependență între adâncimea de penetrare și precizie. Nu se pot identifica microfisuri ale armăturilor și pierderi secționale mici. Interpretarea datelor în cazul tecilor metalice necesită experiență, iar tecile din polietilenă de înaltă densitate pot face imposibilă detectarea golurilor.

4.3.9 Ecoul de impactului

Metoda constă în introducerea unui impuls datorat unui impact mecanic printr-un punct de pe suprafața elementului (figura 4.7). Vibrațiile induse se propagă sub 3 forme de unde acustice: frontale de compresiune (*C*), distorsionate de forfecare (*F*) și de suprafață tip Rayleigh (*R*). Undele de tip (*F*) și (*C*) se propagă în fronturi sferice, pentru care golurile, fisurile și interfețele (ca de exemplu cele dintre beton și armătură) acționează ca și suprafețe de reflexie.

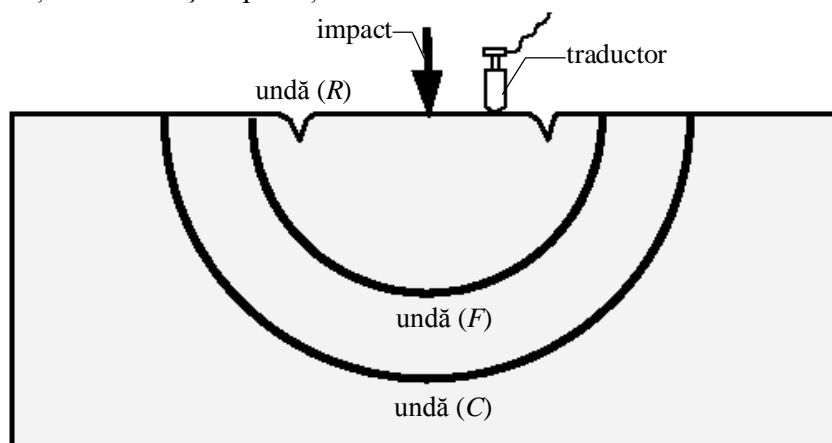
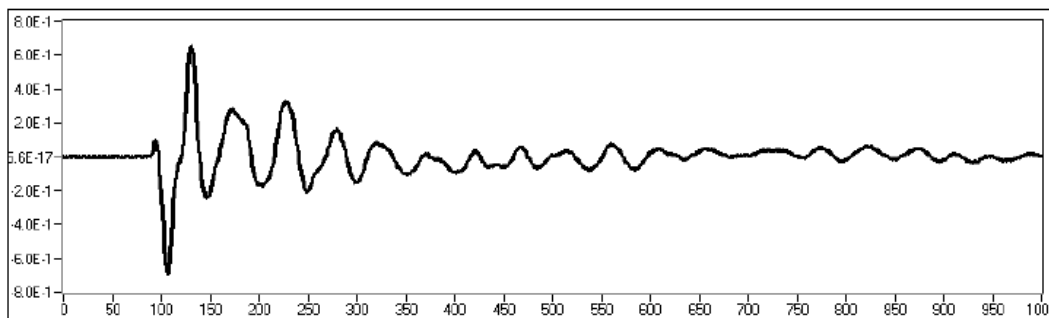


Fig. 4.7 Principiului metodei ecoului de impact

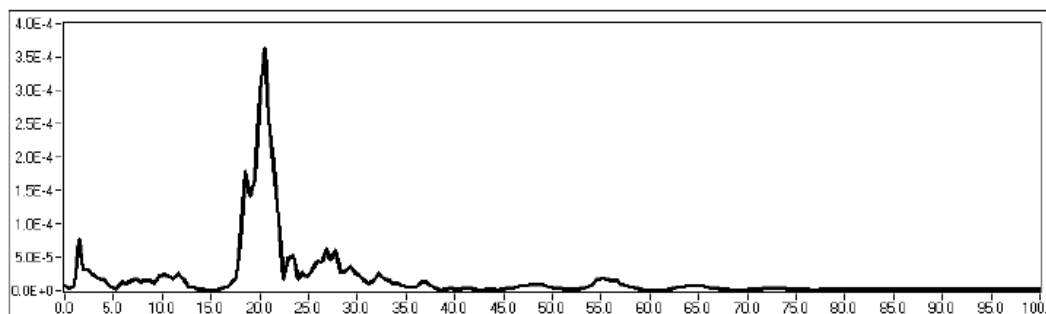
Traductorul de deplasare amplasat în apropierea punctului de impact monitorizează recepția undelor reflectate, care sunt convertite în fișier ASCII pentru domeniul timp-deplasări (figura 4.8.a). După aceea, pentru a se stabili cu precizie cauza reflectării undelor (*C*), datele se convertesc prin transformări Fourier în domeniu de frecvență (figura 4.8.b) și sunt filtrate. Vârfurile de amplitudine corespunzătoare frecvențelor caracteristice permit detectarea golurilor și armăturilor active sau pasive.

Având determinat domeniul de frecvențe, prin relații matematice simple se pot identifica elementele și defecțiunile corespunzătoare amplitudinilor. De exemplu, grosimea (*h*) a unui element solid de beton simplu rezultă din relația:

$$h = \frac{C_c}{2v} \tag{4.2}$$



a. istoricul tipic timp-deplasare



b. spectrul de frecvență

Fig. 4.8 Vizualizarea înregistrărilor tipice metodei ecoului de impact

unde $C_c=3.0-5.0$ km/s este viteza undelor (C) în beton, iar v este frecvența corespunzătoare unui vârf din graficul analizat. Determinarea grosimilor materialelor unui element compozit se face considerând coeficientul de reflexie (R_{12}) a undelor acustice la interfața de contact a două materiale:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.3)$$

unde Z_1 și Z_2 sunt impedanțele acustice specifice (egale cu produsul dintre viteza undelor și densitatea materialului) a celor două materiale (vezi tabelul 4.2).

Tab. 4.2 Impedanțe acustice specifice pentru diferite materiale

| Materialul | Impedanța acustică specifică (kg/s m ²) |
|------------|---|
| aer | 0.4 |
| apă | 0.5×10^6 |
| soluri | $(0.3-0.4) \times 10^6$ |
| beton | $(7.0-10.0) \times 10^6$ |
| oțel | 47.0×10^6 |

Metoda nu permite cuantificarea cu precizie a prezenței coroziunii sau microfisurării armăturilor și nu se poate aplica la armături postîntinse, iar interpretarea rezultatelor necesită multă experiență.

4.3.10 Perturbarea câmpului magnetic

Metoda constă în aplicarea unui câmp magnetic puternic asupra armăturilor active ale unui element, prin scanarea suprafeței laterale și inferioare, în vederea identificării de perturbațiilor cauzate de prezența defectelor în tendoane sau beton (figura 4.9).

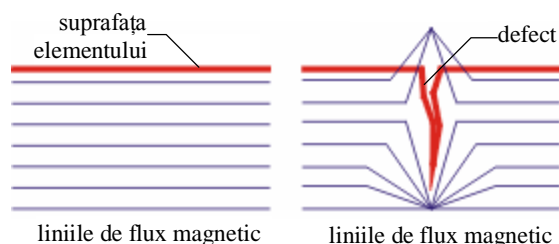


Fig. 4.9 Perturbarea fluxului magnetic în zone de discontinuitate

Mărimea perturbațiilor depinde de mai mulți factori, cei mai importanți fiind: caracteristicile câmpului magnetic indus, mărimea fisurii sau microfisurii și distanța dintre aparatură și defect. Distorsiunile liniilor magnetice (figura 4.10) se pot pune în evidență după aplicarea pe fața elementului a unui strat de suspensie de parafină cu particule fine de tuș negru, sau prin utilizarea unor pulberi fluorescente în suspensie și vizualizarea sub lumină ultravioletă.

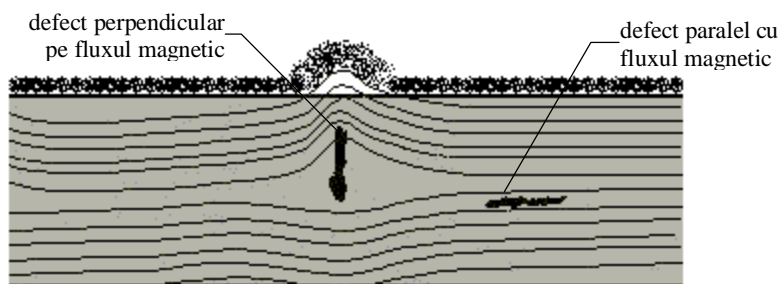


Fig. 4.10 Vizualizare perturbații și erori la defecte paralele cu liniile fluxului magnetic

Îmbunătățirea metodei s-a realizat prin utilizarea senzorilor magnetici, care prin preluarea automată a datelor furnizează informații sub format digital (figura 4.11) și numeric.

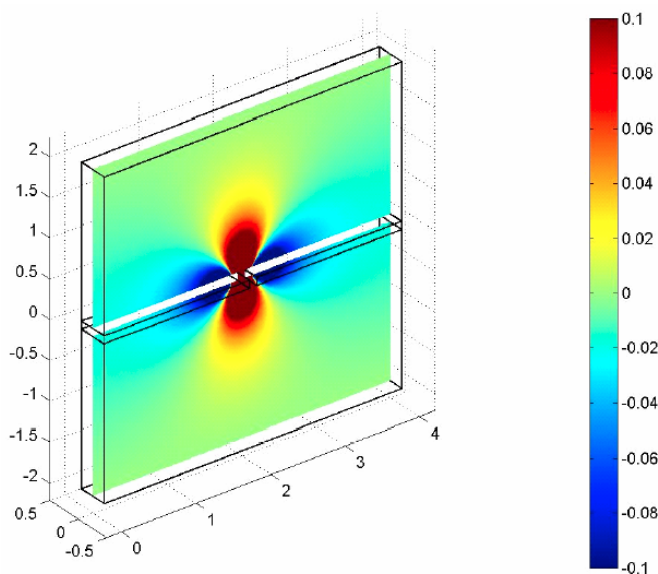


Fig. 4.11 Vizualizarea digitală a perturbării fluxului magnetic

Pe lângă localizarea fisurilor și golurilor în beton, această metodă permite depistarea coroziunii sau cedării armăturilor, fiind deja etalonate defecte ca focare

locale de coroziune, indentații sau ruperi ale sârmelor toroanelor pretensionate, fără ca direcția acestora să influențeze acuratețea rezultatelor. Totuși, pierderile minime de secțiune sesizate sunt de 5 % în zone fără etriere și 40 % în zonele cu etrieri. De asemenea, mărimea defectului este direct proporțională cu semnalul, astfel încât microfisurile existente în masa oțelului pot să nu fie detectate. Astfel, este necesară o bună cunoaștere a structurii (proiectului) pentru a se putea obține o interpretare corectă a rezultatelor. Această metodă nu permite detectarea defectelor în tendoanele protejate cu teeci metalice și a golurilor din mortarul de ciment injectat.

4.3.11 Polarizarea lineară

Metoda polarizării lineare permite măsurarea atât a ratelor mari cât și mici ($\leq 2.5 \mu\text{m}/\text{an}$) de corodare a armăturii în beton.

Principiul metodei constă în introducerea unui curent electric într-un mediu electrolitic, în cazul de față asigurat de betonul, cu o diferență de potențial de $\pm 25 \text{ mV}$ decât diferența de potențial electric care conduce la apariția coroziunii electrochimice. Măsurând intensitatea curentului și diferența de potențial poate fi determinată rezistența de polarizare unitară a suprafeței metalice:

$$i_{\text{cor}} = B \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (4.4)$$

unde:

i_{cor} – intensitatea unitară a curentului de coroziune ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);

ΔI – intensitatea curentului aplicat (mA);

ΔU – diferența de potențial măsurată (mV).

Constanta B are valori între 13-52 mV pentru mediile metalice și este dată de relația:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \quad (4.5)$$

unde β_a și β_c sunt constantele Tafel, anodică și respectiv catodică.

Prin rezolvarea ecuației Stern-Geary (4.4) se determină intensitatea curentului de coroziune electrochimică. Convertirea datelor în viteză de corodare în mm/an se face prin algoritmi implementați prin intermediul unei plăci de achiziție montată la un laptop și o mică unitate de comandă.

Această tehnică se bazează pe ipoteza că sârmele individuale ale unui toron suferă aceeași rată de corodare, astfel încât influența unui singur focar este raportată întregii arii transversale. În plus, nu se poate face o legătură directă între viteza de corodare și mărimea pierderilor de secțiune. Metoda nu face diferență între armătura activă și pasivă și nu se poate aplica tendoanelor postîntinse.

4.3.14 Monitorizarea emisiei acustice

Metoda se bazează pe înregistrarea emisiei acustice care apare când materialele se depreciază. În principal se pot identifica sunete produse fisurarea betonului și fracturarea tendoanelor, fiind în curs de etalonare și sunetele produse de coroziunea armăturii. Undele acustice astfel emise se propagă cu o anumită viteză și frecvență prin mediul asigurat de beton, procesarea și analiza lor (figura 4.12) punând în evidență un eveniment etalonat în prealabil. Monitorizarea are un caracter permanent datorită preluării continue senzori acustici distribuiți pe structură. Fiecare senzor constă într-un accelerometru și un circuit, care transmit datele la o unitate centrală de procesare (figura 4.13).

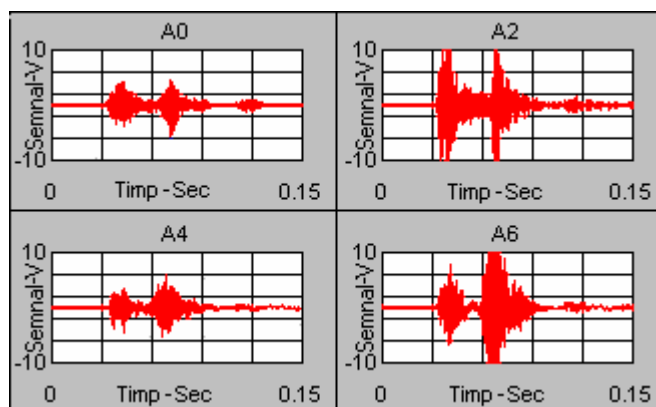


Fig. 4.12 Semnalul acustic transmis de senzori la ruperea unei sârme a toronului pretensionat

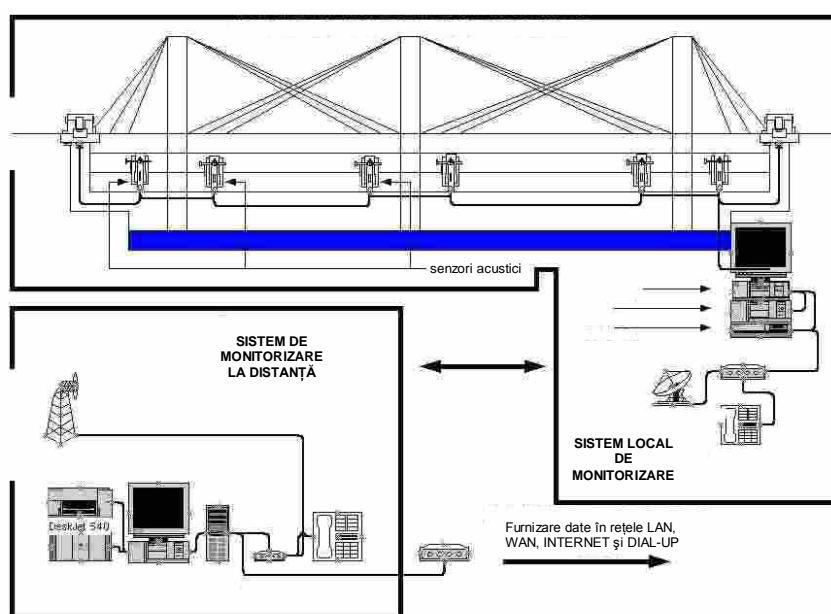


Fig. 4.13 Circuitul de preluare, transmitere și procesare a datelor

Evenimentul care marchează ruperea unei sârme poate reprezenta în fapt o rupere singulară sau multiplă. Frecvențele mari ale unor ruperi localizate indică deficiențe locale structurale, care trebuie investigate suplimentar pentru a asigura siguranța și exploatarea normală în continuare a structurii.

Procesarea semnalelor primite permite identificarea evenimentelor noi, dar nu și a celor deja existente deja la momentul implementării sistemului sau a celor care apar când sistemul nu funcționează. Estimarea acestora se efectuează prin analize statistice complementare. Prin implementarea tehnicilor statistice de analiză se poate estima și probabilitatea de apariție a unor evenimente viitoare și să se stabilească istoricul probabil al evenimentelor.

4.4 Cuantificarea stării tehnice a unui element

La un moment dat al duratei sale de exploatare, starea tehnică a unui element de beton precomprimat la un moment dat se raportează la:

- parametri calitativi direcți: calitatea betonului, tipul și calitatea sistemului de pretensionare, tipul și calitatea armăturii pasive;

- parametri calitativi indirecti: tipul și calitatea subansamblului structural din care face parte elementul, tipul și calitatea structura de rezistență, tipul și calitatea infrastructurii, respectiv natura și calitatea terenului de fundare;
- parametri de funcțiune: calitatea execuției și respectarea prevederilor proiectului, condițiile de exploatare, calitatea subansamblurilor nestructurale, calitatea lucrărilor de întreținere și reparații.

Evaluarea parametrilor calitativi și de funcțiune, care determină starea tehnică a unui element la momentul constatării, se cuantifică în baza indicilor (sub formă procentuală) de calitate și respectiv funcționalitate, stabiliți în urma inspecțiilor vizuale și extinse efectuate in situ, raportați la:

- severitatea degradării, deprecierei sau defectului constat;
- extinderea degradării, deprecierei sau defectului constat;
- relevanța degradării, deprecierei sau defectului asupra stării tehnice a elementului;
- urgența lucrărilor de remediere (reparații sau consolidări) necesare pentru înlăturarea degradării, deprecierei sau defectului constat.

În raport cu media ponderată a indicilor calitativi (MPI) și de funcțiune, clasificarea stării tehnice a unui element este prezentată în tabelul 4.3.

Tab. 4.3 Clasificarea stării tehnice a elementelor de beton precomprimat

| Starea tehnică | MPI (%) | Observații și măsuri recomandate |
|-----------------------|---------|---|
| Foarte bună | 81÷100 | Efectuarea lucrărilor de reparații curente și capitale în conformitate cu graficul inițial. Eventual măsuri de îmbunătățire a caracteristicilor estetice. Durabilitatea este conformă cu cea estimată. |
| Bună | 61÷80 | Materialul din care este alcătuit elementul prezintă un început de degradare cu defecte și degradări vizibile. Rectificarea eventuală a graficului inițial de efectuare a lucrărilor de reparații curente și capitale. Estimarea din nou a durabilității elementului. |
| Satisfăcătoare | 41÷60 | Elementul prezintă degradări vizibile pe zone întinse cu afectarea secțiunii transversale. Efectuarea de lucrări de reparații curente sau capitale. Estimarea din nou a durabilității elementului. |
| Nesatisfăcătoare | 21÷40 | Elementul este într-o stare avansată de degradare. Efectuarea de reparații capitale, consolidarea sau înlocuirea elementului. Estimarea din nou a durabilității elementului. |
| Nu prezintă siguranță | <20 | Elementul nu asigură condițiile minime de siguranță. Înlocuirea sau consolidarea elementului, eventual a consolidarea structurii și sistemului de fundare sau demolarea construcției. Estimarea din nou, dacă este cazul, a durabilității elementului. |

Stabilirea ponderii parametrilor în ansamblul stării tehnice se efectuează prin calcule probabilistice, în continuare fiind prezentate valorile propuse în cadrul proiectului de cercetare, în baza analizelor directe și a unor referințe bibliografice.

Indicii de calitate pentru calitatea betonului din element:

- defecte de suprafață ale feței văzute (culoare neuniformă, pete negre, impurități, pete de rugină, aspect prăfuit, imperfecțiuni geometrice, aspect macroporos, agregate mari la suprafață): 7÷9 %;
- infiltrații, eflorescențe: 1÷3 % pentru suprafețe $S < 2.0 \text{ m}^2$, 4÷6 % pentru $2.0 \text{ m}^2 \leq S < 5.0 \text{ m}^2$, respectiv 7÷9 % pentru $S > 5.0 \text{ m}^2$;
- segregarea betonului, caverne: 10 % la fibra superioară sau inferioară, 4 % pe înălțimea elementului;
- beton degradat prin carbonatare: 10 % la elementele precomprimate aderent, 8 % la elementelor cu armături postîntinse;

- beton cu aspect friabil și/sau zone din beton exfoliat, beton degradat prin transportul agenților chimici agresivi: 10 % la elementele precomprimate aderent, 8 % la elementele cu armături postîntinse;
- eroziunea betonului, prezența unor zone pe suprafața elementului în care agregatele nu sunt înglobate în pasta de ciment: 2÷4 % pentru $S < 1.0 \text{ m}^2$, 3÷5 % pentru $1.0 \text{ m}^2 \leq S < 3.0 \text{ m}^2$, respectiv 4÷6 % pentru $S > 3.0 \text{ m}^2$;
- fisuri de contracție (neorientate, scurte, superficiale); 2÷4 % pentru $S < 1.0 \text{ m}^2$, 4÷6 % pentru $S > 1.0 \text{ m}^2$;
- fisuri și/sau crăpături ale betonului: 10 % pentru $\alpha_f > 1.0 \text{ mm}$, 8÷9 % pentru fisuri longitudinale cu $\alpha_f > \alpha_{fad}$, 9÷10 % pentru fisuri transversale sau înclinate cu $\alpha_f > \alpha_{fad}$;

Indicii de calitate pentru tipul și calitatea sistemului de pretensionare sunt:

- armături preîntinse fără strat de acoperire suficient: 6÷8 %;
- focare de coroziune a armăturii preîntinse, pete de rugină orientate pe direcția acesteia: 7÷8 %;
- focare de coroziune a armăturii postîntinse: 8÷9 %;
- coroziunea extinsă a armăturii postîntinse: 12 %;
- neprotejarea ancorajelor armăturii postîntinse: 6÷8 %;
- despicarea zonei de ancorare a armăturilor preîntinse: 9÷11 %;
- infiltrații de-a lungul armăturii active: 8 %.

Indicii de calitate pentru tipul și calitatea armăturii pasive sunt:

- armături pasive cu strat de acoperire insuficient: 2÷3 %;
- armături pasive transversale fără strat de acoperire suficient: 1÷2 %;
- focare de coroziune a armăturii pasive, pete de rugină orientate pe direcția acesteia: 4÷6 %;
- coroziunea extinsă a armăturii pasive: 6÷8 %;
- infiltrații de-a lungul armăturii pasive: 5 %.

Indicii de calitate pentru tipul și calitatea subansamblului structural din care face parte elementul:

- săgeți excesive ($f > f_{ad}$) ale elementului sau subansamblului structural: 9÷11 %;
- dacă elementele similare adiacente elementului analizat prezintă toate indicii calitativi direcți inferiori celor ai elementului analizat, elementul va avea aceiași indicii de calitate ca și ai elementelor vecine; aceeași prevedere se aplică și grupurilor de elemente similare care sunt mai puțin de 10 % din total;
- elemente similare adiacente (nu în condițiile punctului precedent) cu indicii calitativi direcți inferiori elementului analizat: 10÷15 %;
- elemente de alt tip din același subansamblu care nu asigură în condiții de siguranță rezemarea elementului analizat: 10÷15 %.

(4.10) Indicii de calitate pentru tipul și calitatea structura de rezistență (elementul nu face parte din structura de rezistență analizată):

- săgeți excesive ($f > f_{ad}$) ale elementului: 6÷8 %;
- structura de rezistență nu asigură în condiții de siguranță transmiterea eforturilor din subansamblul din care face parte elementul analizat: 10÷20 %.

Indicii de calitate pentru tipul și calitatea infrastructurii (se aplică dacă elementul analizat face parte din structura de rezistență):

- tașări excesive ($\Delta > \Delta_{ad}$) ale sistemului de fundare: 6÷8 %;
- sistemul de fundare nu asigură în condiții de siguranță transmiterea eforturilor la terenul de fundare: 10÷20 %.

Indicii de calitate pentru natura și calitatea terenului de fundare (se aplică dacă elementul analizat face parte din structura de rezistență sau sistemul de fundare):

- stratificația terenului de fundare din zona bulbului activ a suferit modificări defavorabile preluării eforturilor transmise de infrastructură: 10÷20 %.

Indicii de funcțiune pentru calitatea execuției și respectarea prevederilor proiectului:

- proiectul de execuție al elementului nu respectă exigențele impuse de durata de exploatare prevăzută în tabelul 1.1: 15÷30 %;
- execuția se abate defavorabil de la prevederile proiectului de execuție ale elementului: 5÷30 %.

Indicii de funcțiune pentru condițiile de exploatare:

- condițiile de exploatare inițiale s-au schimbat defavorabil sub aspectul acțiunilor mecanice: 15÷30 %;
- condițiile de exploatare inițiale s-au schimbat defavorabil sub aspectul agresivității mediului: 5÷20 %.

Indicii de funcțiune pentru calitatea subansamblurilor nestructurale:

- subansamblurile nestructurale afectează direct și negativ exploatarea elementului analizat: 5÷20 %.

Indicii de funcțiune pentru calitatea lucrărilor de întreținere și reparații:

- lucrările de întreținere și reparații efectuate nu au respectat graficul și afectează defavorabil elementul: 15÷30 %.

Ponderea parametrilor calitativi și de funcțiune este următoarea:

- suma indicilor calitativi direcți: 65 %;
- suma indicilor calitativi indirecti: 25 %;
- suma indicilor de funcțiune: 10 %.

5 NOI CONCEPTE PENTRU CREȘTEREA DURABILITĂȚII

5.1 Betonul autocompactant

Betonul autocompactant reprezintă cea mai spectaculoasă descoperire din ultimele decenii în domeniul construcțiilor din beton.

Conceptul de beton autocompactant a fost propus de H. Okamura, (Universitatea din Tokio Japonia), la sfârșitul anilor '80, ca răspuns la cerințele stringente în ceea ce privește realizarea structurilor de beton durabile.

Acesta, prin capacitatea sa de autocompactare, umple toate colțurile cofrajului doar din propria greutate, fără necesitatea compactării betonului prin vibrare, conferindu-i o mare rezistență la segregare precum și ușurință în realizarea formelor deosebite ale structurilor de beton proiectate.

Datorită utilizării tot mai intense în lume a betonului autocompactant, au fost elaborate o serie de recomandări, ghiduri și rapoarte în numeroase țări din Europa, Japonia și SUA. Prin acestea s-a avut în vedere reglementarea metodelor de testare privind lucrabilitatea betoanelor, proiectarea amestecurilor, condiții de punere în operă și exploatare, domenii de utilizare propuse, etc.

Compoziția amestecului de beton autocompactant comparativ cu amestecul de beton obișnuit compactat prin vibrare se prezintă în figura 5.1.

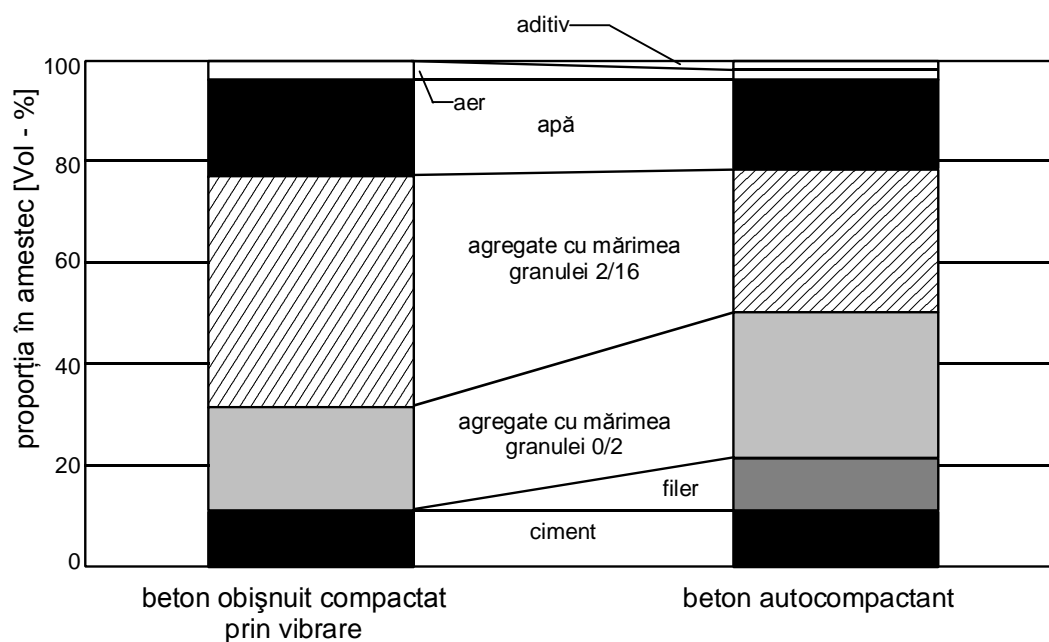


Fig. 5.1 Compoziția amestecului de beton autocompactant în comparație cu betonul obișnuit compactat prin vibrare

5.1.2 Materialele constituente și caracteristici

Materialele constituente ale betonului autocompactant sunt cele uzuale folosite la prepararea betoanelor: ciment, agregate, apă, aditivi, adaosuri și eventual fibre.

Cimentul

La prepararea betonului autocompactant se pot folosi toate tipurile de ciment reglementate de EN 197-1, alegerea corectă a tipului de ciment fiind dictată de cerințele specifice fiecărei aplicații în parte.

Adaosuri

Adaosurile se utilizează în scopul îmbunătățirii și menținerii coeziunii precum și rezistenței la segregare a amestecurilor de beton autocompactant.

Adaosurile, în funcție de capacitatea lor reactivă față de apă, pot fi de 2 tipuri:

- tip I (inerte sau semi-inerte): filere minerale (de calcar, dolomitice, etc.), pigmenti;
- tip II:
 - puzzolanice: cenușă zburătoare (conform EN 450), praf de silice (conform EN 13263);
 - hidraulice: zgură granulată de furnal.

Filerele minerale utilizate cel mai des sunt cele bazate pe carbonat de calciu datorită influenței lor benefice asupra proprietăților betonului proaspăt respectiv gradului de finisare ridicat a pe care le conferă suprafețelor de beton.

Cea mai avantajoasă fracțiune granulometrică este cea sub 0,125 mm, cu recomandarea ca procentul de treceri pe sita de 0,063 mm să fie mai mare de 70%

Pigmenții conform EN 12878, se utilizează la prepararea betonului autocompactant în același mod ca la betonul obișnuit, vibrat, dispersia pigmentilor fiind mai bună iar uniformitatea culorii mai ridicată la betonul autocompactant datorită fluidității amestecului de beton.

Cenușa zburătoare și praful de silice îmbunătățesc rezistența la segregare, rezistențele mecanice și durabilitatea betonului.

Trebuie însă avut în vedere faptul că cenușa poate afecta stabilitatea dimensională.

Zgura granulată de furnal este un material cu proprietăți hidraulice latente de liant, care este prezent și în componența cimenturilor compozite CEM II sau CEM III.

Folosit ca adaos în componența betonului autocompactant contribuie la îmbunătățirea proprietăților în stare proaspătă a amestecurilor de beton, cu precizarea că proporțiile prea ridicate de zgură pot afecta stabilitatea betonului crescând de asemenea riscul segregării.

Agregate

Agregatele trebuie să fie conform cerințelor EN 12620 sau EN 13055-1 (cazul agregatelor ușoare), respectiv să corespundă cerințelor de durabilitate din EN 206.

Dimensiunea maximă a agregatelor se stabilește în funcție de cerințele legate de particularitățile lucrării, în general fiind limitată la 20 mm. Agregatele sub 0,125 mm contribuie la conținutul în parte fină a amestecului de beton.

Pentru menținerea producției de beton autocompactant la un nivel calitativ constant se impune monitorizarea continuă a umidității, absorbției de apă, granulometriei și variației conținutului în parte fină a agregatelor.

Aditivi

Aditivii preponderent utilizați sunt superplastifianții sau aditivii mari reducători de apă, conform EN 934-2 care determină lucrabilitatea specifică betonului

autocompactant. Aditivii modificatori de vâscozitate se folosesc pentru stabilitatea amestecului, reducerea riscului de segregare, fiind foarte utili în cazul variației caracteristicilor materialelor în principal a gradului de umiditate. Condițiile de admisibilitate, pentru aditivii modificatori de vâscozitate, din EN 934-2 se completează cu prevederile din ghidul elaborat de Comitetul Tehnic al Asociației Ciment Aditivi (CAA) din Marea Britanie.

Conform cerințelor se mai folosesc aditivi antrenori de aer pentru îmbunătățirea rezistenței la îngheț-dezghet, întârziatori de priză, etc.

Fibre

În producția de beton autocompactant s-au utilizat fibre de oțel sau de natură polimerică. S-a constatat existența riscului de a reduce capacitatea de curgere a betonului, fiind necesară stabilirea tipului, lungimii și cantității optime al fibrelor pentru atingerea caracteristicilor dorite atât pentru betonul proaspăt cât și pentru cel întărit.

Fibrele polimerice se pot utiliza pentru îmbunătățirea stabilității betonului autocompactant precum și pentru prevenirea fisurării datorită contracției plastice a betonului.

Fibrele de oțel sau cele polimerice lungi, structurale s-au folosit pentru modificarea ductilității/tenacității betonului întărit. Lungimea și cantitatea lor se alege în funcție de mărimea maximă a agregatelor respectiv de cerințele constructive specifice.

Utilizarea betonului autocompactant cu fibre în structuri cu armătură obișnuită duce la creșterea semnificativă a riscului de blocare, ceea ce nu se întâmplă în cazul substituiri armăturii obișnuite cu fibre.

5.1.3 Caracteristicile betonului în stare proaspătă

Betonul autocompactant este caracterizat în stare proaspătă de trei proprietăți: capacitatea de umplere, capacitatea de trecere și rezistența la segregare. Acestea pot fi definite în felul următor:

- capacitatea de umplere – proprietatea betonului autocompactant de a curge doar sub propria greutate și de a umple complet toate spațiile din cofraje;
- capacitatea de trecere – proprietatea betonului autocompactant de a curge prin deschideri strâmte, cum ar fi spațiile dintre barele de armătură, fără să prezinte tendințe de segregare sau de blocare;
- rezistența la segregare – proprietatea betonului autocompactant de a rămâne omogen în timpul transportului și a punerii în operă.

Aceste caracteristici nu pot fi determinate prin încercări uzuale, standardizate, lucrabilitatea betonului autocompactant neîncadrându-se în clasele de lucrabilitate prevăzute de EN 206: 2002. Din acest motiv, cercetările făcute în acest sens au relevat faptul că proprietățile betonului autocompactant trebuie testate concomitent prin mai multe metode experimentale, pentru diferiți parametri ai lucrabilității.

Nominalizarea unui beton ca fiind autocompactant implică satisfacerea condițiilor de admisibilitate la determinările efectuate conform tabelului 5.1.

În proiectarea amestecului de beton autocompactant se iau în considerare proporțiile relative ale componentelor cheie, exprimate în următoarele valori volumice:

- raportul apă/pulbere, în volum de 0.8 la 1,1;
- conținut total de pulbere, între 160 – 240 l (400 – 600 kg)/m³;
- conținut normal de agregat grosier 28 la 35% / volum de amestec;
- raportul apă/ciment selectat pe baza cerințelor, fără să depășească 200 l/m³;

Tab. 5.1 Metode de determinare și condiții de admisibilitate privind caracteristicile betonului autocompactant în stare proaspătă (d_{max} . agregate = 20 mm)

| Nr. crt. | Metode | Proprietatea testată | UM | Condiții | |
|----------|---------------------------|-------------------------|------------|----------|--------|
| | | | | Minime | Maxime |
| 1 | Tasarea cu conul Abrams | De umplere | mm | 650 | 800 |
| 2 | Tasarea la T_{50cm} | De umplere | sec | 2 | 5 |
| 3 | Inel J | De trecere | mm | 0 | 10 |
| 4 | Pâlnia V | De umplere | sec | 6 | 12 |
| 5 | Pâlnia V la $T_{5minute}$ | Rezistența la segregare | sec | 0 | +3 |
| 6 | Cutia L | De trecere | (h2/h1) | 0,8 | 1,0 |
| 7 | Cutia U | De trecere | (h2-h1) mm | 0 | 30 |
| 8 | Cutie de umplere | De trecere | % | 90 | 100 |
| 9 | Sită GTM | Rezistența la segregare | % | 0 | 15 |
| 10 | Orimet | De umplere | sec | 0 | 5 |

- conținutul de nisip echilibrează volumele celorlalți constituenți.
Amestecurile proiectate se verifică conform încercărilor din Tab. 1, iar în caz de performanțe nesatisfăcătoare se reproiectează amestecul, luând în considerare următoarele acțiuni:
 - utilizarea suplimentară de filer, ca supliment de parte fină;
 - modificarea proporțiilor de nisip sau agregat;
 - folosirea unui agent modificador de vâscozitate (în cazul în care nu a fost utilizat);
 - ajustarea dozajului de superplastifianți și/sau a agentului modificador de vâscozitate;
 - folosirea de tipuri alternative de aditivi superplastifianți;
 - ajustarea dozajului adaosurilor pentru a modifica cantitatea de apă și raportul apă/pulbere din amestec.

5.1.4 Malaxarea și transportul betonului autocompactant

Betonul autocompactant poate fi realizat cu orice fel de malaxor: cu palete, cu cădere liberă, autobetoniere, dar se preferă în general malaxoarele cu amestec forțat.

Timpul de malaxare a betonului autocompactant este mai mare decât cel pentru betonul obișnuit datorită forțelor de frecare reduse precum și pentru activarea totală a superplastifiantului.

Eficiența malaxorului și secvența optimă de dozare a componentilor se stabilește în urma probelor preliminare. Volumul amestecului de beton trebuie să fie minim jumătate din capacitatea malaxorului.

5.2 Betonul compozit cu fibre disperse

Betonul este caracterizat de o excelentă capacitate portantă la compresiune, dar și de o capacitate portantă redusă și casantă la întindere. Pornind de la aceste proprietăți, principalele motivații pentru introducerea fibrelor metalice disperse în masa betonului la elementele precomprimate:

- necesitatea îmbunătățirii comportării la întindere, atât din punctul de vedere al capacității portante cât și al ductilității, asigurându-se astfel o comportare superioară în exploatare;
- reducerea consumului de oțel în armături pasivă prin reducerea drastică a armăturilor transversale și a armăturilor constructive.

5.2.1 Comportarea betonului compozit cu fibre disperse din oțel

Betonul armat cu fibre disperse din oțel are capacitatea de a prelua eforturi de întindere chiar dacă betonul propriu-zis este fisurat. Proprietățile materialului compozit întărit sunt puternic influențate atât de fibre din oțel, prin tipul (vezi figura 5.1), distribuția și orientarea lor, cât și de proprietățile matricei de beton.



Fig. 5.1 Exemple de fibre din oțel

Mecanismul prin care fibrele de oțel măresc rezistența la întindere a betonului compozit constă în interconectarea și controlul fisurilor care se dezvoltă în beton. După atingerea rezistenței (efortului ultim) la întindere, numărul de fibre de pe unitatea de suprafață joacă un rol fundamental în comportarea materialului. Numărul de fibre care interconectează fețele fisurii și modul de cedare, atât al fibrelor cât și al aderenței interfețelor matrice de beton-- fibre, guvernează performanța la ductilitate a materialului compozit. Considerând un număr suficient de fibre și un efect favorabil la smulgerea fibrelor (aderență suficientă) în secțiunea fisurată, se asigură o fisurare multiplă, caracterizată de o pseudo întărire cu elongația, adică o creștere substanțială a capacității portante după fisurarea betonului. Astfel, materialul este caracterizat de o valoare mai mare a rezistenței la întindere și o comportarea mai ductilă.

Rigiditatea și rezistența materialului compozit se raportează următorilor parametri ai fibrelor: densitatea, factorului de aspect (lungime/diametru), rezistența la întindere și modulul de elasticitate. Cu privire la influența amestecului de beton, acesta intervine prin rezistența la întindere, modulul de elasticitate, densitate și, foarte important, prin curba granulometrică a agregatelor. Comportarea zonei de interfață dintre beton și fibră, care influențează comportarea de ansamblu a materialului compozit, depinde de densitatea betonului, aderența și orientarea fibrelor. Pentru a se asigura o bună calitate a materialului compozit trebuie asigurat un control al parametrilor de producție, evitându-se astfel defecte ca și smulgeri ale fibrelor, goluri, aglomerări de fibre și alte discontinuități.

Cedarea materialului compozit este mult mai casantă dacă aceasta are loc prin ruperea fibrelor și nu prin smulgerea lor, așa cum se pune în evidență în figura 5.2.

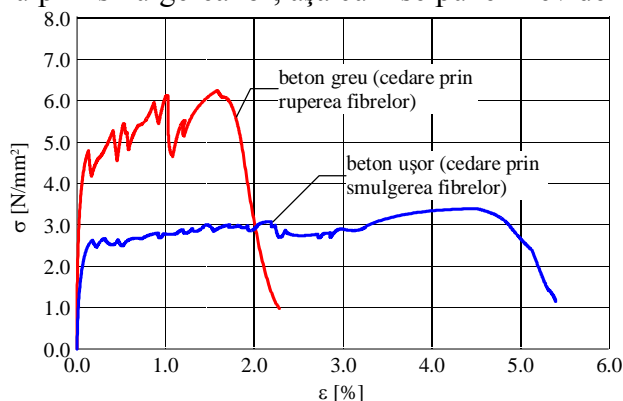


Fig.5.2 Comportarea la întindere a betonului armat cu fibre disperse

O analiză similară celei sintetizate de figura 5.2, dar în condiții de încărcare mai generale (cazul încovoierii pure), pune în evidență că răspunsul ductil la nivelul punctului material al betonului compozit conduce la o secțiune activă la cedare (modul de rezistență) de câteva ori mai mare decât în cazul răspunsului casant, aspect care se regăsește într-o capacitate portantă mai mare. La amestecul casant, datorită neparticipării materialului dinspre fibra extremă întinsă la preluarea sarcinilor, rezultă o capacitate portantă limitată. Aceste comportări sunt ilustrate în figura 5.3, unde se prezintă distribuția eforturilor la cedarea unei grinzi ductile și respectiv casante. Rezultatele încercărilor arată că acest raport este de circa 3.5 în cazul betoanelor ușoare și de 2.0 pentru betoane grele.

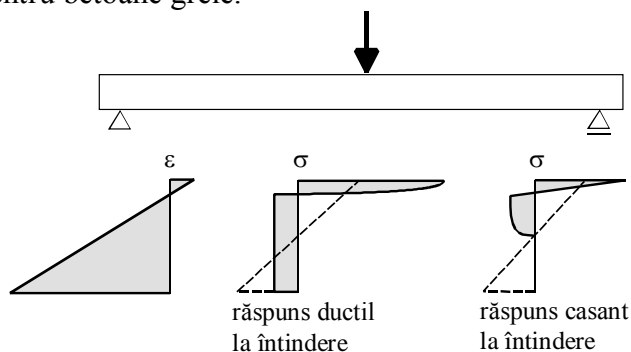


Fig. 5.3 Răspunsul efort unitar – deformație specifică la cedarea secțiunilor transversale încovoiate

5.2.2 Orientarea și distribuția fibrelor

Avantajul utilizării extrudării la produsele din ciment este acela că se formează sub forțe mari de compresiune și forfecare. Un alt avantaj specific acestora este că în cazul aplicării corecte a tehnologiei și controlul corect al amestecului, fibrele se pot alinia pe direcția eforturilor. În cazul fabricării și vibrării tradiționale, fibrele se orientează haotic, cu excepția cazului în care sunt influențate de condițiile de contur. Orientarea finală a fibrelor depinde atât de interacțiunea dintre fibre, dar mai ales de granulometria și distribuția agregatelor. Dispersia și orientarea fibrelor poate fi cuantificată atât prin numărarea directă a fibrelor pe unitatea de suprafață cu ajutorul unui microscop optic, cât și prin forma secțiunii transversale a fibrelor, așa cum este schematizat în figura 5.4.

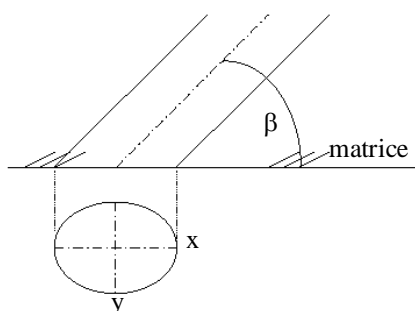


Fig. 5.4 Orientarea fibrelor

Distribuția fibrelor

În paralel cu orientarea fibrelor, și distribuția lor este influențată de condițiile de contur, granulometrie și tehnologia de execuție. Numărul de fibre pe unitatea de suprafață este un parametru foarte important pentru valoarea rezistenței la întindere a compozitului și a comportării ductile. Ecuația curentă este

$$N_1 = \alpha \frac{V_f}{A_f} \quad (5.1)$$

unde

N_1 - numărul de fibre pe unitatea de suprafață;

V_f - fracțiunea volumului de fibre din beton;

A_f - aria secțiunii transversale a fibrelor;

α - factor de orientare.

Tehnologia de execuție

Tehnologiile de execuție sunt:

- turnare în cofraj;
- extrudare cu piston;
- extrudare cu șnec.

Elementele turnate în cofraj prezintă o distribuție haotică a fibrelor, în timp ce elementele extrudate au fibrele cu orientarea pe direcția axială ca urmare a mecanismului de ghidare (piston sau șnec). Ca și în cazul armăturilor tradiționale, orientarea optimă a fibrelor este pe direcția eforturilor de întindere, perpendicular pe direcția fisurii, creând o legătură între fețele acesteia. Astfel, proprietățile betonului se îmbunătățesc prin adăugarea de fibre, pe direcția acestora, iar ductilitatea trebuie optimizată prin intermediul fibrelor cu o orientare favorabilă

Influența agregatelor asupra orientării și distribuției fibrelor

Mărimea agregatelor are o influență semnificativă asupra distribuției și orientării fibrelor (vezi figura 5.5). În cazul mortarelor de ciment, fibrele sunt separate doar de particule fine, care se pot mișca liber printre acestea. În cazul betonului, toate agregatele care au dimensiunea maximă mai mare decât distanța medie dintre fibre vor conduce la aglomerări de fibre în ghemotoace, rezultând o distribuție neregulată a acestora. Acest efect de aglomerare crește odată cu dimensiunea agregatelor și are o influență negativă asupra proprietăților betonului. Figura 4.5 prezintă o vedere interioară a fenomenului micro-mecanic privind îmbunătățirea comportării ductile prin creșterea cantității de cenușă zburătoare și agregat fin. Acest fenomen a fost ilustrat prima oară de Song și Van Zijl în anul 2004, ei neutilizând agregate grosiere care tind să afecteze comportarea ductilă unică a materialului compozit.

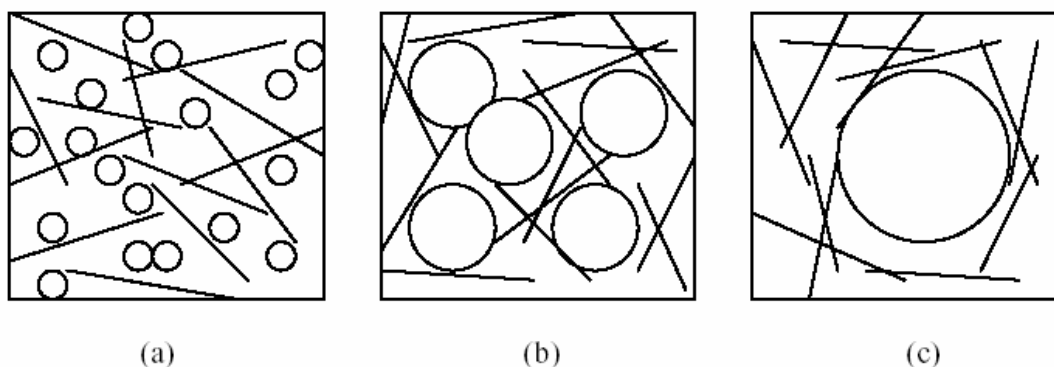


Fig. 5.5 Influența dimensiunii particulelor asupra distribuției și orientării fibrelor, respectiv asupra lucrabilității materialului compozit

5.2.3 Aderența fibre-beton

Privire retrospectivă a studiilor efectuate

Măsura în care fibrelor pot contribui la rezistența betonului depinde de raportul de aspect al fibrelor (L/d), fracțiunea volumului de fibre din beton (V_f) și de

factorul de aderență al fibrelor sau rezistența la forfecare prin frecare (τ), afectată cu factorul de dispersie g , după cum urmează:

$$\sigma_u = \frac{1}{2} g \tau \frac{L}{d} V_f \quad (5.2)$$

Analog ecuației (4.2), factorul fibrelor F a fost formulat ca

$$F = \frac{L}{d} V_f \beta \quad (5.3)$$

cu β fiind un coeficient de aderență care introduce efectul formei secțiunii fibrelor, deformațiile geometrice cum sunt îndoirile sau indentațiile. Cu factorul fibrelor (F) este ușor de a evalua contribuția proprietăților fibrelor la rezistența betonului compozit și de a prezice ce influență va avea orice ajustare a proprietăților fibrelor asupra betonului compozit.

Coeficientul de aderență al fibrelor

Multe din metodele preliminare determinarea aderenței dintre fibre și matricea de beton se bazau pe simple încercări de smulgere în care o extremitate sau ambele extremități ale fibrei erau înglobate în matricea de beton, iar fibra era acționată direct la întindere în timp ce blocul de beton era blocat. Datorită indentațiilor, curburilor sau extremităților îngroșate, în mod evident cresc semnificativ proprietățile de aderență. Prelucrarea statistică prin analize de regresie a datelor rezultate din aceste teste conduc la următoarele valori acoperitoare pentru diferite forme de fibre:

$\beta=0.5$ pentru fibre rotunde și rectilinii;

$\beta=0.75$ pentru fibre cu extremități îngroșate sau sinusoidale;

$\beta=1.0$ pentru fibre indentate.

Factorul de aspect (L/d)

Comportarea diferențiată a diferitelor forme geometrice de fibre și diverse tehnologii de execuție poate fi explicată prin proprietățile diferite de aderență și a proprietăților matricei de beton. La betoanele compozite extrudate un factor de aspect redus este mai avantajos decât în cazul betoanelor turnate, datorită densificării matricei de beton și a creșterii factorului fibrelor F , rezultând o tendință de rupere a fibrelor relativi lungi deoarece transferul eforturilor de aderență este posibil pe o lungime mai mare.

Rezistența la întindere a fibrelor

O cerință esențială este ca rezistența la întindere a fibrei să fie suficientă pentru a permite exploatarea întregului potențial de aderență la interfața de contact dintre fibră și beton. De aceea, rezistența la întindere a fibrelor trebuie asociată capacității portante a betonului compozit. Aceasta presupune o proporționalitate între rezistențele matricei de beton și a fibrelor, pentru a se obține o cedare controlată și optimizată. Cazul ideal este ca rezistența la întindere a fibrelor și efortul ultim de aderență rezultat din încercările de smulgere să fie egale. În consecință, betoanele compozite pentru aplicații unde este necesar un potențial mare de rezistență necesită fibre cu rezistențe la întindere mari.

Efectul lungimii fibrelor

O lungime mare a fibrelor îmbunătățește comportarea mecanică a betoanelor compozite turnate și o reduce pe cea a betoanelor compozite extrudate. Comportarea optimă o au fibrele cu lungimi suficiente pentru a avea rezistența la aderență adecvată, prezentând și o rezervă de rezistență la întindere. Modul de cedare este puternic influențat de lungimea fibrelor. Dacă aceasta este mai redusă decât lungimea critică, cedarea betonului compozit va fi însoțită de smulgerea fibrelor. Dacă lungimea

fibrelor este mai mare decât cea critică, cedarea compozitului va fi însoțită de ruperea fibrelor.

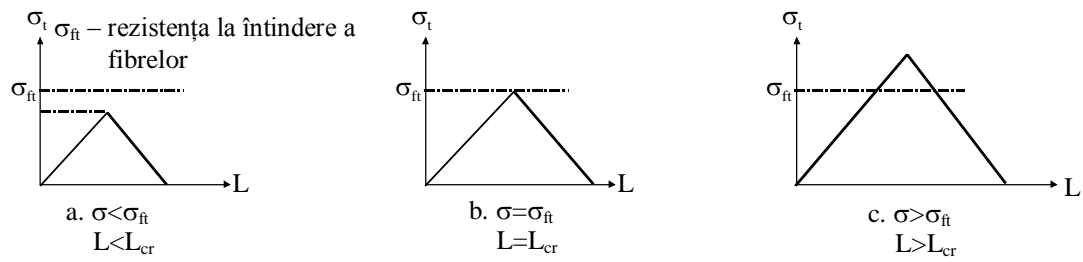


Fig. 5.6 Definirea lungimii critice a fibrelor

6 CERCETĂRI EFECTUATE ÎN CADRUL PROGRAMULUI EUCONS

6.1 Fundamentele cercetării

Degradarea timpurie și accelerată a structurilor din beton precomprimat este o problemă delicată pentru proprietarii și administratorii fondului construit, datorită resurselor financiare, adesea insuficiente, pentru întreținerea, repararea sau reabilitarea acestora. În cadrul programului național de cercetare-dezvoltare “*Integrarea sectorului construcții în sistemul European - EUCONS*”, INCERC filiala Cluj-Napoca a demarat proiectul “*Evaluarea, controlul și prognozarea stării tehnice a patrimoniului construit de beton precomprimat, prin prisma reglementărilor și tendințelor europene*” având ca scop abordarea unitară a următoarelor aspecte:

- metode avansate pentru proiectarea, controlul și prognoza durabilității structurilor din beton precomprimat;
- îmbunătățirea sistemului informațional și a bazei de date privind condițiile de mediu;
- crearea de facilități pentru transferul tehnologic;
- schimbarea politicii și a practicii manageriale în vederea optimizării costurilor în exploatare.

Activitățile prevăzute a se efectua în cadrul proiectului sunt:

- inventarierea și asamblarea unei date de baze care să asigure suportul unor viitoare analize probabilistice și statistice;
- finalizarea unui program experimental promovat de INCERC filiala Cluj-Napoca începând cu anul 1977 privind comportarea elementelor de beton armat și precomprimat în medii industriale agresive;
- elaborarea unei metodologii pentru prognozarea durabilității și estimarea stării tehnice a elementelor de beton precomprimat.

6.2 Inventariere și investigații in situ

Proiectul a demarat prin inițierea unei inventarieri considerând ca și parametri următoarele informații de bază:

- profilul deținătorului de informații (agenția de administrare a infrastructurii transporturilor, regie de alimentare cu apă, reprezentanță teritorială a ISC, societate comercială cu profil industrial, producător de prefabricate etc.);
- tipul elementelor și structurilor din beton precomprimat (elemente liniare și de suprafață solicitate la încovoiere, elemente liniare comprimate excentric, elemente de suprafață întinse excentric, ferme, structuri spațiale de suprafață, structuri spațiale asamblate din elemente liniare etc.);
- tipul precomprimării (tipul armăturii active, traseul armăturii active, tendoane preîntinse sau postîntinse, gradul de precomprimare);

- amplasamentul structurilor (în mediu industrial interior și exterior, amplasamente urbane intravilan, amplasament extravilan)
- caracteristicile mediului de exploatare (mediu industrial, mediu industrial cu agresivitate chimică, mediu marin, mediu neagresiv);
- perioada în care s-a proiectat și construit obiectivul.

Activitatea de colectare a datelor este în continuă desfășurare, iar acestea sunt stocate sub forma unor baze de date de tip *.dbf (format dBASE IV). Începând cu ianuarie 2005 colectarea datelor se va putea efectua și direct prin intermediul portalului internet creat pe website-ul filialei. Datele colectate până în prezent pun în evidență următoarele:

- peste 90 % din elementele precomprimate sunt realizate cu armături active preîntinse;
- elementele cu armături postîntinse (sub 10 % din total) au un sistem de protecție de tip rigid, realizat prin injectarea tecilor cu pastă de ciment;
- nu există informații cu privire la implementarea sistemelor de pretensionare neaderente și a sistemelor de pretensionare cu tendoane compozite (confeționate în principal din fibre de carbon, fibre de sticlă etc.).

Pentru obiectivele cuprinse deja în baza de date, s-a demarat o evaluare preliminară a lor stării tehnice. La poduri, aceasta s-a efectuat în șapte județe din Transilvania (în cooperare cu DRDP Cluj) și județul Constanța. Pentru alte tipuri de construcții, acțiunea s-a desfășurat cu asistența departamentelor regionale din cadrul Inspecției de Stat în Construcții și a altor instituții și agenții administrative, producători, proprietari etc. Până în prezent s-au efectuat inspecții vizuale la 123 de poduri (116 în Transilvania și 7 în zona de coastă a Mării Negre), totalizând o lungime de 6.2 km. Au mai fost investigate 43 de structuri și elemente pretensionate pentru hale industriale și magazine de tip cash & carry, 21 structuri pretensionate circular (rezervoare, silozuri etc.) și 3 structuri spațiale de acoperiș. Rezultatele acestor inspecții au fost sintetizate prin cuantificarea și clasificarea stării tehnice în baza următoarelor criterii și categorii de observații:

- foarte bună: fără fisuri vizibile și deformații excesive, aspect corespunzător al zonelor de ancorare și transfer, aspect corespunzător al ariei de trafic, fără deteriorări în zonele critice, aspect corespunzător al aparatelor de reazem, fără indicii exterioare de coroziune a armăturilor, fără infiltrații și/sau scurgeri de lichide, fără probleme de infrastructură;
- bună: fără fisuri și deformații excesive, fără deteriorări în zonele critice, infiltrații și/sau scurgeri de lichide minore și cu caracter local, focare de coroziune locale și restrânse ca număr, aspect satisfăcător al ariei de trafic;
- satisfăcătoare: fisuri cu deschideri apropiate de deschiderile limită, fără deformații excesive, deteriorări cu caracter local a zonelor critice, infiltrații și/sau scurgeri de lichide numeroase și/sau extinse, focare de coroziune numeroase, beton delaminat sau exfoliat, aparate de reazem degradate, aspect necorespunzător al ariei de trafic.

Așa cum se pune în evidență prin tabelul 6.1, în cazul podurilor starea tehnică este în general bună. Totuși, trebuie precizat că această situație se referă doar la podurile din beton precomprimit, din care circa 40 % au fost reabilitate în ultimii zece ani, iar necesarul de noi investiții este încă foarte mare.

La halele industriale și magazinele de tip cash & carry (cu structura principală de rezistență de tip cadre) au fost identificate următoarele tipuri de elemente de beton precomprimit: rigle prinse articulat, elemente prefabricate de suprafață pentru planșee intermediare și de acoperiș, și grinzi continue pentru căi de rulare. Din analiza individuală a elementelor și raportarea acestora la întregul ansamblu, starea tehnică a

acestor clădiri a fost clasificată astfel: 7 clădiri în stare foarte bună, 32 clădiri în stare bună, iar 4 clădiri în stare satisfăcătoare. În cazul structurilor precomprimate circular, 1 a fost clasificată ca fiind în stare satisfăcătoare, 21 în stare bună și 7 în stare foarte bună. Din cele 3 structuri spațiale investigate, 2 învelitori subțiri au fost considerate în stare foarte bună, iar 1 acoperiș prefabricat de tipul rețelor spațiale de bare asamblate prin post-comprimare a fost considerat ca fiind în stare bună.

Tab. 6.1 Sinteza rezultatelor inspecțiilor vizuale pentru podurile din beton precomprimat

| Durata de exploatare (ani) | Starea tehnică pentru numărul de unități | | | | | |
|----------------------------|--|------------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| | <i>foarte bună</i> | | <i>bună</i> | | <i>satisfăcătoare</i> | |
| | total | reabilitate în ultima decadă | total | reabilitate în ultima decadă | total | reabilitate în ultima decadă |
| > 55 | 4 | 4 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 45÷55 | 1 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 35÷45 | 9 | 9 | 9 | 0 | 1 | 1 |
| 25÷35 | 17 | 13 | 31 | 8 | 7 | 0 |
| 15÷25 | 14 | 6 | 18 | 2 | 1 | 0 |
| 5÷15 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| < 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Principala cauză directă pentru degradarea în regim accelerat a elementelor și structurilor de beton precomprimat a fost identificată ca fiind coroziunea. De exemplu, în cazul unui pod amplasat în zona de coastă a Mării Negre (vezi figura 6.1), unii bolțari ai grinzilor precomprimate prezintă fisuri longitudinale care pun în evidență cu claritate prezența coroziunii extinse în talpa inferioară a grinzii precomprimate, datorită penetrării ionilor de clor și carbonatării betonului.



Fig. 6.1 Fisuri în bolțarii prefabricați tipice coroziunii

Principalele cauze indirecte ale degradării sunt: erorile de proiectare (datorită în principal insuficienței atenției acordată detaliilor), execuția defectuoasă sau de slabă calitate și întreținerea necorespunzătoare. Toate aceste cauze indirecte se manifestă pe fondul unei lipse a planificării și coordonării atât a execuției construcțiilor cât și a lucrărilor de întreținere și reabilitare.

6.3 Cercetări experimentale

În anii 1977 și 1979, INCERC filiala Cluj-Napoca a confecționat 30 de elemente din beton precomprimat (vezi figura 6.2), care au fost depozitate sub nivelul sarcinilor de exploatare de lungă durată în medii industriale, după cum urmează:

- în mediu cu un conținut bogat în clor (mediu cu concentrații de Cl_2 și HCl în aer variind între 0.01 și 3.05 mg/m^3) au fost depozitate 20 bucăți în 1977 la fabrica de produse chimice Turda);
- în mediu cu un conținut bogat de azot (concentrații în aer de NH_4 între 0.16 și 0.38 mg/m^3 , respectiv de NO_2 între 0.015 și 0.5 mg/m^3) au fost depozitate 10 bucăți în 1979 la fabrica Azomureș din Târgu-Mureș.

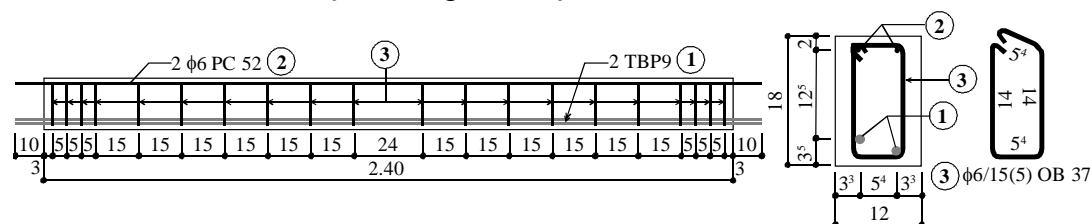


Fig. 6.2 Elemente precomprimate expuse în medii industriale agresive

Tabelul 6.2 prezintă principalele caracteristici ale betoanelor (betoane ușoare - BU și betoane obișnuite - BO) înglobate în elemente. Alți parametri considerați sunt tipul de ciment (RIM- cu rezistențe inițiale mari și SRA - rezistent la sulfatați), conținutul de ciment, raportul apă/ciment, tratamentul (cu aburi) și protecția anticorozivă (pelicule din clorcauciuc și perclorvinil).

Tab. 6.2 Caracteristici beton în elementele confecționate în 1977 și 1979

| Index | A/C | Ciment | | Beton | | |
|--------|------|--------|-----------------------|-------|------------------------|----------------------------|
| | | tip | conținut (kg/m^3) | tip | densitate (kg/m^3) | $F_{ccub,28}$ (N/mm^2) |
| OS 550 | 0.42 | SRA | 550 | BO | 2,230 | 46.0 (47.2) |
| OR 550 | 0.42 | RIM | 550 | BO | 2,365 | 49.0 (48.5) |
| OS 650 | 0.37 | SRA | 650 | BO | 2,333 | 57.0 (32.5) |
| OR 650 | 0.34 | RIM | 650 | BO | 2,387 | 53.0 (54.3) |
| US 550 | 0.50 | SRA | 550 | BU | 1,830 | 39.0 (40.1)) |
| UR 550 | 0.50 | RIM | 550 | BU | 1,878 | 39.0 (38.7) |
| US 650 | 0.48 | SRA | 650 | BU | 1,872 | 47.7 (30.5) |

Armăturile active de tip TBP 9, au fost pretensionate la un efort unitar de control $\sigma_{pk}=1,330 N/mm^2$. Sarcinile de exploatare au fost etalonate pentru a se obține un grad parțial de precomprimare, cu fisurile la fibra inferioară având deschideri de 0.02-0.05 mm și respectiv 0.1 mm. Analiza datelor din tabelul 6.2 arată că la elementele OS 650 - SRA și US 650 - SRA, determinarea rezistențelor pe cub la vârsta de 28 de zile a fost efectuată în mod eronat.

În cadrul prezentului proiect, au fost preluate și investigate 4 elemente (index OS 550 2 buc., US 550 2 buc.) depozitate în mediu cu un conținut bogat în clor, respectiv 8 elemente (index OS 550 2 buc., OS 650 2 buc., respectiv US 550 2 buc. și US 650 2 buc.).

Inspectarea vizuală (efectuată în laborator și fără sarcini exterioare) a celor 12 elemente a pus în evidență următoarele:

- elemente în mediu cu clor: nici un element nu a fost protejat, piatra de ciment a fost spălată la suprafață, extremitățile libere ale toroanelor au fost ruginite, fisurile

normale erau închise, iar la un element (de tip OS 550) betonul era dislocat local în zona de aplicare a sarcinilor;

- elemente în mediu cu azot: peliculele celor 4 elemente protejate erau distruse în proporție de 35÷45 %, piatra de ciment a fost spălată la suprafață, extremitățile libere ale toroanelor au fost ruginite, fisurile normale erau închise.

Testele de coroziune au pus în evidență pierderi de secțiune transversală ale toroanelor de 2÷5 % la elementele neprotejate expuse în mediu cu clor, 1÷12 % la elementele neprotejate și 2÷4 % la elementele protejate expuse în mediu cu azot. Rezultatele testelor chimice sunt prezentate în tabelul 6.3.

Tab. 6.3 Rezultate ale testelor chimice

| Index | Mediu | Adâncimea de carbonatare (mm) | Concentrația Cl ⁻ la suprafață (% din greutatea betonului) |
|-----------------------|-------|-------------------------------|---|
| OS 550 protejat [1] | clor | 4÷9 | 0.01÷0.05 |
| OS 550 neprotejat [2] | clor | 5÷11 | 0.03÷0.70 |
| US 550 neprotejat [1] | clor | 3÷15 | 0.04÷0.06 |
| US 550 neprotejat [2] | clor | 7÷21 | 0.03÷0.04 |
| OS 550 neprotejat [1] | azot | 4÷7 | - |
| OS 550 neprotejat [2] | azot | 5÷9 | - |
| OS 650 protejat [1] | azot | 2÷4 | - |
| OS 650 protejat [2] | azot | 3÷4 | - |
| US 550 protejat [1] | azot | 3÷6 | - |
| US 550 protejat [2] | azot | 2÷5 | - |
| US 650 neprotejat [1] | azot | 4÷8 | - |
| US 650 neprotejat [2] | azot | 4÷10 | - |

În termenii relației moment–săgeată la mijlocul deschiderii, rezultatele testelor de încovoiere (figura 6.3) sunt prezentate în figurile 6.4 și 6.5. În raport cu testele martor, după 23 de ani și respectiv 25 de ani de expunere în medii industriale agresive, capacitatea portantă a elementelor este semnificativ mai redusă:

- elemente în mediu cu clor: pierderi de capacitate portantă de circa 12 % la elementele OS 550 neprotejate și respectiv 21 % la elementele US 550 neprotejate;
- elemente în mediu cu azot: reduceri medii cu 18 % pentru elementele OS 550 neprotejate, 14 % la elementele US 550 protejate, 11 % pentru elementele OS 650 protejate și 19 % la elementele US 650 neprotejate.



Fig. 6.3 Încercarea la încovoiere a elementelor depozitate în medii industriale agresive

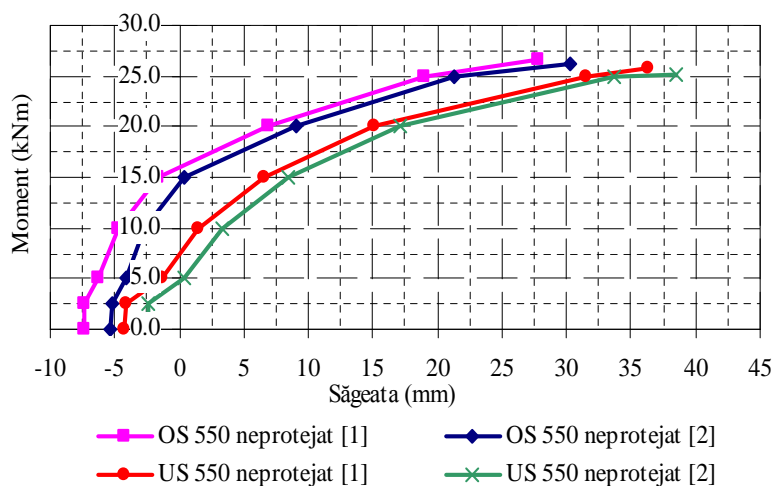


Fig. 6.4 Relația moment-săgeată la elementele depozitate în mediu cu clor începând cu 1977

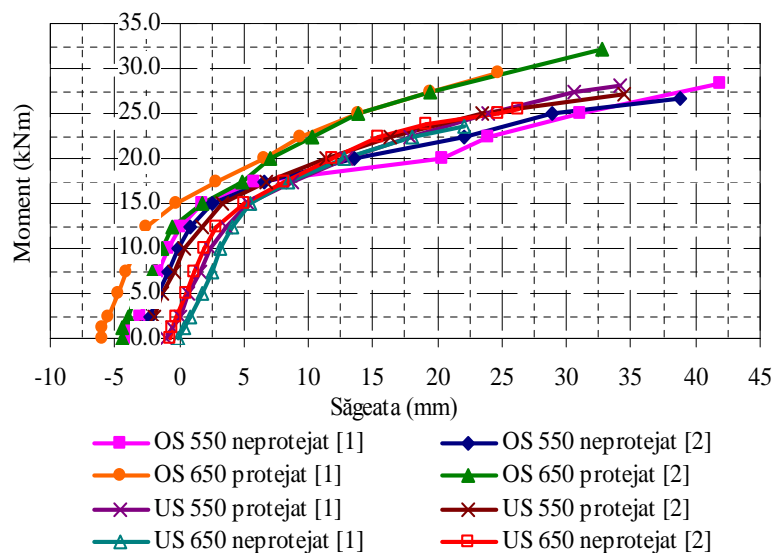


Fig. 6.5 Relația moment-săgeată la elementele depozitate în mediu cu azot începând cu 1979

Majoritatea elementelor au cedat prin încovoiere (figura 6.6.a), doar elementul US 650 neprotejat cedând datorită delaminării betonului, pierderii premature și generale a aderenței armăturii active (figura 6.6.b).



a. prin încovoiere
b. prin pierderea generală a aderenței

Fig. 6.6 Moduri de cedare ale elementelor precomprimate