
RICONOSCERE E PREVENIRE LA FESSURAZIONE DEL
CALCESTRUZZO E DEL CEMENTO ARMATO



RECOGNIZING AND PREVENTING CRACKING IN CONCRETE AND
REINFORCED CONCRETE

PROF. DR. VITO ALUNNO ROSSETTI, ING. MARINA ROSSI

RICONOSCERE E PREVENIRE LA FESSURAZIONE DEL CALCESTRUZZO E DEL CEMENTO ARMATO

RECOGNIZING AND PREVENTING CRACKING IN CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE

PROF. DR. VITO ALUNNO ROSSETTI*, ING. MARINA ROSSI

1. INTRODUZIONE

La fessurazione delle strutture in calcestruzzo ed in cemento armato è un problema di considerevole importanza poiché si presenta frequentemente e danneggia in modo apprezzabile le opere. La presenza di fessure, infatti:

- consente il contatto dei ferri d'armatura con l'ossigeno, quindi la formazione di pile e di reazioni anodiche proprie della corrosione;
- crea delle vie di facile accesso per eventuali sostanze aggressive responsabili del degrado;
- se si presenta con certe geometrie può far perdere monoliticità alla struttura.

Lo scopo di questa nota è quello di consentire il riconoscimento della causa delle fessure, in base alla loro morfologia, alle loro dimensioni ed alla tempistica della loro formazione, e di indicare misure preventive.

2. FESSURAZIONE E NORMATIVA

Il problema della fessurazione è considerato sia dalle Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso, (metodo delle tensioni ammissibili e metodo semiprobabilistico agli stati limite, Decreto Ministeriale del 14 febbraio 1992 e del 9 gennaio 1996), che dalle Norme europee sperimentali Eurocodice 2 (UNI ENV 1992/1/1).

Il metodo delle tensioni ammissibili, limitatamente al caso di precompressione totale o limitata, per strutture collocate in ambiente aggressivo prevede la verifica della sicurezza alla fessurazione, definendo il coefficiente convenzionale di sicurezza:

$$\eta_f = M_f / M_e$$

Dove M_f ed M_e sono rispettivamente il momento che provoca la fessurazione ed il momento massimo di esercizio. Il coefficiente η_f deve risultare $\geq 1,2$.

Il metodo semiprobabilistico agli stati limite in funzione della sensibilità dell'armatura alla corrosione, delle combinazioni delle azioni e delle condizioni ambientali, limita l'apertura delle fessure a valori nominali pari a 0,4 (caso di armatura poco sensibile alla corrosione, di combinazione di azioni frequente e di ambiente poco aggressivo), 0,2 e 0,1.

* Dipartimento ICMMPM, Università di Roma «La Sapienza».

1. INTRODUCTION

The cracking of concrete and reinforced concrete structures is a problem of considerable importance since it frequently occurs and appreciably damages them. Cracking in fact has these consequences:

- it allows oxygen to come in contact the reinforcing steel, with the resulting formation of galvanic piles and of anode reactions that bring about corrosion;
- it creates paths of easy access for any aggressive agents that can cause deterioration;
- in certain geometries, it can cause the structure to lose its monolithic nature.

The purpose of this paper is to make it possible to recognize the cause of cracking, on the basis of crack morphology and dimensions, and of the times involved in crack appearance, indicating how to avoid their formation.

2. CRACKING AND STANDARDS CODES

The problem of cracking is considered both by the Italian technical regulations for the design, construction and proof-testing of ordinary-reinforced and prestressed concrete structures (allowable stresses method and the semi-probabilistic ultimate limit state method, Ministerial Decree of February 24th 1992 and of January 9th 1996), and by the Eurocode 2 (UNI-ENV 1992) European prestandards.

The allowable stresses method, for the cases of full or partial prestressing only, for structures located in aggressive environments calls for checking cracking safety, and defines a conventional safety coefficient:

$$\eta_f = M_f / M_e$$

where M_f and M_e are respectively the moment giving rise to cracking and the maximum service moment. The coefficient η_f must be greater than or equal to 1.2.

The semi-probabilistic method at the limit states as a function of the sensitivity to corrosion of the reinforcement, of combinations of forces and of environmental conditions, limits the crack width to nominal values of 0.4 (for reinforcements that are not very sensitive to corrosion, for a frequent combination of forces and for a not very aggressive environment), 0.2 and 0.1.

* ICMMPM Department, University of Rome «La Sapienza».

L'Eurocodice 2 sviluppa ampiamente il problema della fessurazione, con particolare riferimento alle condizioni di esposizione dei manufatti, fornendo anche precise indicazioni per calcolarne l'apertura.

L'attenzione di questi codici è rivolta essenzialmente alla fessurazione causata dai carichi, mentre non vengono date indicazioni dettagliate in merito alle fessure di carattere «tecnologico», trattate in questa nota. In proposito, L'Eurocodice 2 al punto 4.4.2.1 precisa che la prevenzione e la limitazione delle fessure non derivanti da carichi, esulano dal campo di applicazione della Norma.

Nei seguenti paragrafi, vengono presi in considerazione alcuni tra i più comuni tipi di fessurazione; nel presentare le cause ed i meccanismi responsabili del verificarsi di ciascun tipo, ed i possibili metodi di prevenzione, si seguirà un ordine che rispetta i tempi caratteristici con cui si manifestano.

3. FESSURE DA RITIRO PLASTICO

Nelle prime ore di vita del calcestruzzo, l'evaporazione dell'acqua dalla sua superficie libera, ovviamente influenzata dalle condizioni termiche ed igrometriche dell'ambiente, dalla velocità del vento e dal rapporto a/c, determina lo sviluppo più o meno marcato del ritiro plastico.

Questo fenomeno, che si manifesta in concomitanza del verificarsi del bleeding (tendenza delle particelle solide a sedimentare con conseguente affioramento di acqua alla superficie), o più precisamente al termine di quest'ultimo, è una contrazione in senso orizzontale dovuta all'insorgenza di forze di capillarità. Se la velocità di evaporazione supera la velocità di bleeding, la superficie del manufatto si asciuga e si formano dei menischi tra le particelle dei solidi presenti sulla superficie del getto che causano una contrazione parallela alla superficie (ritiro).

La parte di calcestruzzo non a contatto con l'aria genera un contrasto al ritiro, dando origine ad una tensione di trazione orizzontale sulla superficie esposta all'aria, che spesso causa la formazione di fessure.

I manufatti che risultano più soggetti alla fessurazione da ritiro plastico sono quelli con estese superfici libere orizzontali, tipicamente solette, pavimentazioni e platee. Le fessure sono caratterizzate da aperture variabili da 0,1 a 3 mm⁽¹⁾, da lunghezze fino a qualche metro e profondità fino a 15 cm.

Eurocode 2 extensively develops the problem of cracking, with special reference to the concrete object's exposure conditions, providing definite indications for calculating crack width.

These codes' attention is essentially turned to the cracking caused by loads, while detailed indications are not given for cracks of a "technological" nature, dealt with in this paper. In this regard, item 4.4.2.1 of Eurocode 2 states that the prevention and the limitation of cracks not arising from loads lies outside the bounds of the standard's field of application.

In the following sections some among the more common types of cracking are considered. In presenting the causes and the mechanisms responsible for the creation of each type, and the possible prevention methods, an order will be followed that respects the characteristic times with which they are exhibited.

3. PLASTIC SHRINKAGE CRACKS

In the concrete's first hours of existence, the evaporation of water from its free surface brings about the more or less marked development of plastic shrinkage, this of course being influenced by the ambient temperature and humidity and by wind speed and W/C ratio.

This phenomenon, which takes place at the same time as does bleeding (the tendency of the solid particles to sediment with the consequent surfacing of water), or more precisely at the end of this bleeding, is a contraction in the horizontal direction due to the onset of capillary forces. If the evaporation speed exceeds the bleeding speed the object's surface dries and menisci are formed between the particles of the solids on the pour surface, which cause a contraction parallel to the surface (shrinkage).

The portion of concrete not in contact with the air generates a force countering the shrinkage, giving rise to a horizontal traction across the surface exposed to the air, and thus cracks will often form.

The structural elements that are most prone to plastic-shrinkage cracking have large horizontal free surfaces, typically slabs, floorings and rafts. The cracks characteristically have widths of 0.1 to 3 mm⁽¹⁾, with lengths up to a few metres and depths down to 15 cm.

If there is reinforcing steel near the surface, the cracks follow the bars, forming a more or less dense reticule (Photo 1). If there are no steels the cracks take on a "crowsfoot" aspect (Photo 2), that is, three cracks appear that branch from a point on the surface, at times in groups of two as well.

⁽¹⁾ È opportuno distinguere le fessure propriamente dette, facilmente visibili, dalle cosiddette cavillature, fessure con apertura minore di 0,1 mm.

⁽¹⁾ It is worthwhile distinguishing cracks properly so-called, and easily visible, from the so-called hairline cracks, which have widths less than 0.1 mm.

Se vicino alla superficie ci sono ferri d'armatura le fessure seguono i ferri formando un reticolo più o meno fitto (Foto 1); se non ci sono ferri le fessure assumono l'aspetto «a piede di corvo» (Foto 2), cioè di 3 fessure che si diramano da un punto della superficie, a volte anche a gruppi di due.

Poiché una volta formatesi difficilmente vengono eliminate, le fessure da ritiro plastico devono essere opportunamente prevenute o quantomeno limitate. Le misure che possono essere prese allo scopo di prevenire un eccessivo ritiro plastico e conseguente fessurazione sono:

- applicare a spruzzo sulla superficie del calcestruzzo, immediatamente dopo la stesa, un film antievaporante (Foto 3);
- mantenere umida la superficie nebulizzando acqua durante e subito dopo la finitura;
- applicare sulla superficie umida teli bagnati (Foto 4) o impermeabili (Foto 5);
- riparare il calcestruzzo dal vento e dall'irraggiamento solare per prevenire l'evaporazione;
- ridurre il rapporto a/c per diminuire il ritiro plastico e rendere il calcestruzzo più resistente a trazione;
- abbassare la temperatura del calcestruzzo nella stagione calda.

4. FESSURE DA ASSESTAMENTO

La presenza dei ferri di armatura all'interno del getto di calcestruzzo può ostacolare la sedimentazione dei solidi del conglomerato, naturale manifestazione del fenomeno del bleeding. La parte di calcestruzzo che si trova al di sotto dei ferri sedimenta liberamente, mentre quella al di sopra non è in grado di seguirla; si generano allora dei piani di separazione che facilitano successive rotture del manufatto (Foto 6).

5. FESSURE DA ESPANSIONE TERMICA

Questo tipo di fessurazione, che non si osserva molto frequentemente, è caratteristico di manufatti molto massicci, la cui dimensione minima supera 1-2 m (plinti, pile piene, dighe).

A causa della bassa diffusività termica del materiale, il calore sviluppato all'interno di questi manufatti è disperso all'ambiente molto lentamente. Di conseguenza, all'interno la temperatura dopo alcuni giorni può raggiungere i 70°C o più, mentre la parte esterna, raffreddandosi all'aria dopo la scasseratura, raggiunge rapidamente valori prossimi alla temperatura ambiente. Questa distribuzione di temperatura causa una dilatazione del nucleo interno che, non essendo accompagnata da una corrispondente dell'involucro esterno, genera su quest'ultimo tensioni di trazione e quindi fessurazione.

Le fessure si presentano al momento dello scassero con apertura che può raggiungere il mm, profondità anche di diversi decimetri e con la tendenza a formarsi parallelamente al lato lungo dei manufatti (Foto 7); se è presente armatura superficiale le fessure si formano in corrispondenza dei ferri, poiché questi causano concentrazioni locali di tensione. Con l'attenuarsi del gradiente termico, dopo qualche tempo, le fessure tendono a richiudersi, almeno parzialmente.

Per minimizzare gli effetti descritti si possono prendere le seguenti precauzioni:

- usare cementi a basso calore di idratazione;
- abbassare la temperatura del calcestruzzo raffreddando

Since once the plastic-shrinkage cracks have formed they are hard to eliminate, they must be prevented or anyway limited. The measures that can be taken to prevent excessive plastic shrinkage and the consequent cracking are:

- *spraying the concrete surface immediately after spreading with an anti-evaporation film (Photo 2);*
- *keeping the surface moist by a water fogging during and after finishing;*
- *applying wet cloths to the surface (Photo 4) or waterproof canvases (Photo 5);*
- *sheltering the concrete from the wind and from the sun's rays, to prevent evaporation;*
- *reducing the W/C ratio to reduce plastic shrinkage and make the concrete more resistant to tractional stresses;*
- *lowering the concrete's temperature during the hot season.*

4. SETTLEMENT CRACKS

The reinforcing steels within the concrete pour can block the sedimentation of the concrete's solids, a natural manifestation of the phenomenon of bleeding. The portion of concrete that lies below the bars freely settles, while the portion above cannot follow it. Planes of separation are then generated, which can facilitate the subsequent breakage of the concrete (Photo 6).

5. THERMAL EXPANSION CRACKING

This kind of cracking, which is not very frequently observed, is characteristic of very massive structural elements, whose minimum dimension exceeds one or two metres (footings, full-section piers, dams).

Owing to the material's low thermal diffusivity, the heat developed within these structures is dispersed into the environment very slowly. Therefore, after a few days the temperature on the interior can reach 70°C or more, while the outer portion, being cooled in the air after striking of the forms, rapidly reaches values near ambient temperature. This temperature distribution causes an expansion of the interior core that, unaccompanied by a corresponding expansion of the outside shell, generates in this latter tractional forces and therefore cracking.

The cracks are seen at the time of striking, with widths that can reach 1 mm, depths of several tenths of metres, and with a tendency to form parallel to the long side of the object (Photo 7). If there is surface reinforcement the cracks form in correspondence of the rebars, since these cause local stress concentrations. With the attenuation of the thermal gradient, after some time the cracks tend to close again, at least partially.

To minimize the effects described, the following precautions can be taken:

- *the use of cements having low heats of hydration;*
- *the lowering of the concrete temperature by cooling its ingredients before making up the mix, for example by keeping the aggregates in the shade and by adding ice to the mix water.*

In some cases, cooling pipes with flowing water can be used inside the structural elements.

6. THERMAL SHRINKAGE CRACKS

Owing to the development of the heat of hydration of the setting cement, pours that are not very massive (walls, tunnel lin-



Foto/Photo 1 - Fessure da ritiro plastico su lastra armata/Plastic shrinkage cracks in a reinforced slab.

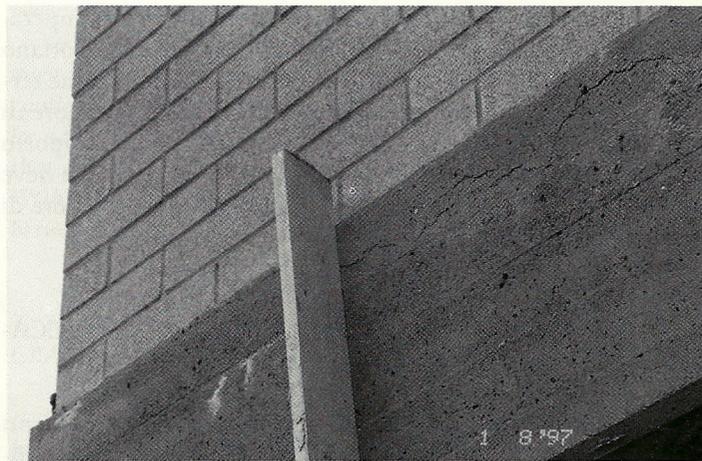
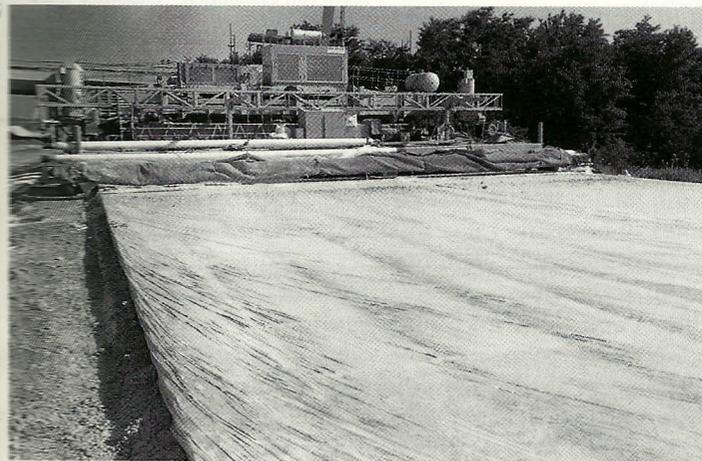
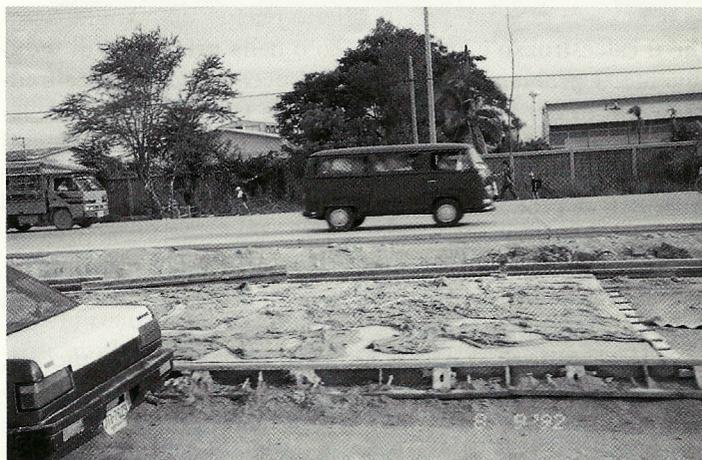
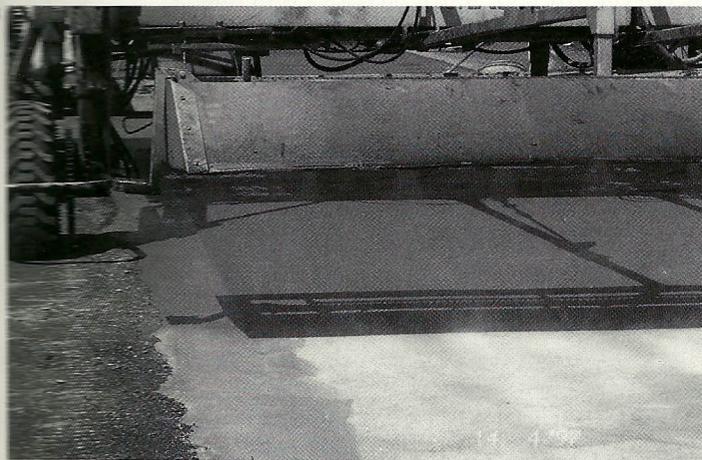
Foto/Photo 2 - Fessure da ritiro plastico tipiche di superfici orizzontali non armate/Plastic shrinkage cracks typical of unreinforced horizontal surfaces.

Foto/Photo 3 - Applicazione del film antievaporante su di una superficie di calcestruzzo appena gettata/Application of anti-evaporation film on a concrete surface that has just been poured.

Foto/Photo 4 - Applicazione di teli bagnati sulla superficie del calcestruzzo/Application of wet canvases on concrete surfaces.

Foto/Photo 5 - Applicazione di teli impermeabili mediante apposito macchinario/Application of waterproof fabrics using special machinery.

Foto/Photo 6 - Fessure da assentamento/Settlement cracking.



gli ingredienti prima di preparare l'impasto, ad esempio tenendo all'ombra gli inerti e aggiungendo all'acqua del ghiaccio. In qualche caso si possono inserire nei getti tubi di raffreddamento con un flusso di acqua fredda.

6. FESSURE DA RITIRO TERMICO

Per effetto dello sviluppo del calore d'idratazione del cemento, getti non molto massicci (muri, rivestimenti di gallerie, pareti di serbatoi, lastre con spessore di 40 cm o più), sono interessati da un innalzamento della temperatura, a volte anche molto consistente.

In condizioni adiabatiche, questo aumento di temperatura può essere calcolato in prima approssimazione con la seguente equazione:

$$\Delta T_1 = Cq_i/\delta C_s \text{ dove:}$$

- C è il dosaggio di cemento in Kg per m³ di calcestruzzo;
- q_i è il calore d'idratazione in Kcal/Kg di cemento a 20°C;
- δ è il peso specifico del calcestruzzo in Kg/m³;
- C_s è il calore specifico del calcestruzzo (0,2 Kcal/Kg).

Il ΔT₁ così calcolato però, è sicuramente più basso del valore realmente raggiunto, poiché gli elementi strutturali non si idratano a temperatura costante e q_i aumenta al variare della temperatura alla quale si idrata il cemento, che va aumentando nel tempo.

Valori approssimati di ΔT₁, per pareti di spessore limitato (e perciò in condizioni non adiabatiche) e per una temperatura media giornaliera dell'aria di 15°C, sono riportati nella Tabella 1, tratta dalla Norma BS 8007.

La temperatura del calcestruzzo raggiunge il suo massimo valore da circa 24 a circa 48 ore dopo il getto; questo riscaldamento non comporta alcun effetto nocivo sui manufatti finché il calcestruzzo è ancora fresco o nella prima fase di indurimento. I problemi nascono nella successiva fase di raffreddamento, in cui avviene la contrazione termica: essendo questa generalmente impedita dalla coazione con altri elementi della costruzione, cui l'elemento che si raffredda è solidale (basamenti), si produce un'elevata tensione di trazione e quindi fessurazione.

Le fessure si generano in direzione ortogonale alla direzione di contrazione e quindi parallelamente al lato corto degli elementi strutturali (Foto 8).

Se la quantità di armatura normale alla superficie è piccola, le fessure si aprono con una spaziatura di 3-5 m e con un valore di apertura fino ad 1 mm; se è in quantità elevata, essa ridistribuisce la fessurazione in fessure più numerose ma più sottili, tipicamente intorno a 0,1-0,2 mm.

Per minimizzare la fessurazione si deve ridurre la temperatura del calcestruzzo fresco e/o il ΔT₁. Per fare ciò si adottano le stesse precauzioni prese nel caso del ritiro da espansione termica o si agisce sul rapporto a/c, essendo noto che il calore di idratazione del cemento cresce con l'aumentare del rapporto a/c. Fissata una resistenza a compressione a 28 giorni, si deve trovare la combinazione ottimale tra tipo, dosaggio e calore di idratazione del cemento.

7. FESSURE DA RITIRO IGROMETRICO (O DA ESSICCAMENTO)

La pasta di cemento presente nel calcestruzzo, in ambienti con umidità relativa inferiore al 95%, tende a perdere pro-



Foto/Photo 7 - Fessure da espansione termica visibili sotto colature di boiacca/Thermal expansion cracks visible under a pour of cement grout.

ings, tank walls, slabs 40 cm deep or more) display a rise in temperature, at times a sizeable one.

Under adiabatic conditions, this increase in temperature can be computed to a first approximation by the following equation:

$$\Delta T_1 = Cq_i/\delta C_s \text{ where}$$

- C is the cement content in kilograms per m³ of concrete;
- q_i is the heat of hydration in Kcal per kilogram of cement at 20°C;
- δ is the specific weight of the concrete in kg/m³;
- C_s is the specific heat of the concrete (0.2 kcal/kg).

The ΔT₁ thus computed will surely be lower than the actual value reached, since the structural members do not hydrate at a constant temperature and q_i increases with the temperature at which the cement hydrates, which increases with time.

Approximate values of ΔT₁ for walls of limited thickness (and therefore under non-adiabatic conditions) and for a daily average air temperature of 15°C, are shown in Table 1, taken from standard BS 8007.

Concrete temperature reaches the peak value at around 24 to 48 hours after pour. This heating is not harmful for the object so long as the concrete is still fresh or while it is in its first hardening phase. The problems arise during the subsequent cooling phase, in which thermal contraction takes place: since this is gen-

TABELLA 1/TABLE 1

VALORI TIPICI DI ΔT₁ (°C), BS 8007 (1987)
TYPICAL VALUES OF ΔT₁, BS 8007 (1987)

Spessori sezione Section thicknesses (mm)	Muro con cassaforma in acciaio Wall with steel form Portland cement 32.5 content (kg/m ³)			Muro con cassaforma in compensato da 18 mm Wall with plywood form 18 mm thick Portland cement 32.5 content (kg/m ³)			Lastre a terra Contento (kg/m ³) di cemento Slab on the ground Portland cement 32.5 content (kg/m ³)		
	325	350	400	325	350	400	325	350	400
300	11	13	15	23	25	31	15	17	21
500	20	22	27	32	35	43	25	28	34
700	28	32	39	38	42	49	—	—	—
1000	38	42	49	42	47	56	—	—	—

gressivamente acqua; di conseguenza le particelle di cemento idratato si avvicinano tra di loro dando luogo al ritiro igrometrico; all'origine di tale comportamento troviamo:

— la tensione capillare $p_{cap} = 2\gamma/r$: con il procedere dell'essiccamento il raggio r dei capillari contenenti acqua diminuisce e quindi l'attrazione tra le particelle aumenta (γ è la tensione superficiale dell'acqua);

— il ridursi della pressione disgiungente, dovuta alla presenza di strati d'acqua adsorbiti sulle particelle di gel di cemento che, mano a mano che l'umidità relativa diminuisce, tende ad annullarsi cosicché le particelle stesse tendono ad avvicinarsi;

— l'energia libera superficiale dei solidi γ^* : per umidità inferiori al 40% questa è molto elevata, pertanto considerando le piccole dimensioni delle particelle del gel di cemento, e quindi l'elevata superficie specifica S , la pressione esercitata sulle particelle $p=2\gamma^*S/3$ raggiunge valori così elevati da causare un'apprezzabile contrazione delle stesse con conseguente riduzione di volume.

Il ritiro igrometrico del calcestruzzo indurito, dovuto al ritiro della pasta cementizia, si sviluppa lentamente, per tempi molto lunghi ed è caratterizzato da una parziale irreversibilità. L'entità del ritiro è influenzata dal contenuto d'acqua, dalla quantità della pasta di cemento, dal tipo e dal diametro massimo dell'aggregato, dalle modalità di posa in opera e stagionatura.

L'eterogeneità dell'ambiente, il fatto che in un manufatto l'umidità venga persa più facilmente dalla superficie e la presenza di vincoli, che impediscono la naturale tendenza alla contrazione generando ritiri differenziali o ritiri impediti, causano tensioni di trazione che portano alla comparsa di fessurazione.

Le fessure da ritiro igrometrico, simili a quelle dovute al ritiro termico (v. Foto 8), si manifestano in particolare su muri e pavimenti, si dispongono parallelamente al lato corto dei manufatti, sono passanti ed hanno un'apertura che varia da 0,2 ad 1 mm.

Il ritiro igrometrico è una funzione complessa del contenuto d'acqua e di cemento del calcestruzzo; per progettare miscele di calcestruzzo a ritiro moderato si deve ridurre l'acqua di impasto mediante l'uso di additivi, scegliere opportunamente i materiali, un'appropriata granulometria ed un diametro minimo elevato. Calcestruzzi privi di ritiro si ottengono con additivi espansivi.

8. FESSURE DOVUTE A FENOMENI CHIMICI

La durabilità di tutte le strutture in calcestruzzo ed in cemento armato può essere compromessa da alcuni fenomeni di carattere chimico.

La presenza di solfati nelle acque e nei terreni a contatto con il calcestruzzo produce fenomeni di degradazione a causa dell'aumento di volume generato dalla formazione di ettringite. L'ettringite deriva dalla reazione tra il solfato di calcio, proveniente dallo ione solfato in contatto con l'idrossido di calcio, e i prodotti d'idratazione degli alluminati del cemento.

Nel processo di degrado si riconoscono tre livelli: in un primo stadio il degrado si presenta sotto forma di una fessurazione diffusa, priva di una direzione preferenziale; in un secondo stadio la fessurazione è accompagnata da rigonfiamenti dello strato corticale, che alterano la planarità delle superfici ed aumentano l'ampiezza delle fessure; il terzo ed ultimo sta-



Foto/Photo 8 - Fessura da ritiro termico, passante e ad intera altezza, sul muro di una vasca di un impianto di depurazione, avente spessore di 70 cm/Thermal shrinkage cracks, through and of full height, in a sludge treatment plant tank wall, 70 cm in thickness.

erally prevented by the constraining effect of other construction elements with which the cooling member is solidly joined (bases), a high tractional stress is created and cracking comes about.

The cracks are generated in the direction normal to the direction of contraction and therefore parallel to the short side of the structural member (Photo 8).

If the amount of reinforcement at the surface is low, the cracks open up at a spacing of 3 to 5 m and with a width of up to 1 mm; if there is a large amount of reinforcement, it redistributes the cracks as more numerous but thinner, typically around 0.1-0.2 mm.

To minimize cracking the temperature of the fresh concrete must be reduced or ΔT_1 must be reduced. To do this, the same precautions as taken in the case of thermal expansion cracking should be adopted; the W/C ratio too can be varied, in fact it is known that the cement's heat of hydration grows with the W/C ratio. With a 28-day crushing strength set, the optimum combination between cement type, content and heat of hydration must be found.

7. HYGROMETRIC SHRINKAGE CRACKING (OR, DRYING CRACKS)

The cement paste in the concrete, where the ambient relative humidity is lower than 95%, tends to progressively lose water.

dio è caratterizzato da distacchi e sfaldamenti dello strato corticale.

Per prevenire l'attacco solfatico è preferibile:

— utilizzare cementi a basso tenore di alluminati (i cosiddetti cementi resistenti ai solfati, v. UNI 9607);

— scegliere un opportuno rapporto a/c per stabilire un adeguato grado di permeabilità del conglomerato e quindi la velocità dell'aggressione (v. UNI 8981/2).

Alcuni aggregati contengono forme di silice reattiva, che reagendo con gli alcali della matrice cementizia (alcali-silica reaction, ASR) causano cospicui fenomeni di degradazione. Il degrado si può manifestare sotto forme distinte. Nel caso di strutture massive contenenti una quantità rilevante di aggregato reattivo distribuito con omogeneità nel conglomerato, il degrado consiste generalmente in una fessurazione diffusa, «a carta geografica», accompagnata da un rigonfiamento, soprattutto nelle zone più esposte all'umidità ambientale. Nel caso di elementi strutturali armati (Foto 9), si verifica la formazione di fessure lineari parallele al lato lungo del manufatto (ad esempio su pilastri si formano fessure sulla mezzeria delle facce verticali). Le fessure sono caratterizzate da aperture che possono raggiungere anche vari mm. Se invece gli aggregati reattivi sono pochi e situati in vicinanza della superficie esposta all'umidità, il degrado si manifesta con il sollevamento e successiva espulsione di una piccola area di calcestruzzo che circonda l'inerte reattivo (pop out); questa tematica è trattata nel-



Foto/Photo 9 - Fessurazione da ASR in elementi strutturali armati/ASR cracking in reinforced structural members.

Therefore, the hydrated cement particles approach one another giving rise to hygroscopic shrinkage. At the origin of this behaviour we find the following:

— the capillary tension $p_{cap} = 2\gamma/r$: with the progress of drying the radius r of the capillaries containing water drops and therefore the attraction between the cement particles increases (γ is the water surface tension).

— the reduction of the disjoining pressure, due to the presence of layers of water adsorbed on the cement gel particles, which, little by little as the relative humidity drops, tends to vanish, so that the particles themselves tend to approach one another.

— the free surface energy of solids, γ^* : for a relative humidity of less than 40% this energy is very high, therefore, considering the small dimensions of the cement gel particles, and hence their high specific surface S , the pressure exerted on the particles, $p=2\gamma^*S/3$, reaches values so high as to cause an appreciable contraction of the particles with consequent reduction of the volume.

The hygroscopic shrinkage of hardened concrete, due to the shrinkage of the cement paste, develops slowly over very long times and is partially irreversible.

The amount of shrinkage is influenced by the water content, by the amount of cement paste, by the type and maximum diameter of the aggregate, by the pour procedures and by the curing.

The heterogeneity of the environment, the fact that in an object moisture is lost more easily from the surface and the presence of constraints that oppose the natural tendency to contraction by generating differential shrinkages or blocked shrinkages, all go together to cause tractional stresses that lead to the appearance of cracking.

Hygroscopic shrinkage cracking, like that due to thermal shrinkage (see Photo 8), appears in particular on walls and floorings; the cracks are arranged parallel to the object's short side, pass through it and have widths running from 0.2 to 1 mm.

Hygroscopic shrinkage is a complex function of the water and cement contents of the concrete. To design concrete mixes having moderate shrinkage the mix water must be reduced by the use of admixtures, the materials must be suitably chosen, and an appropriate aggregate grading and high minimum diameter must be chosen. Non-shrink concretes can be obtained using expansive admixtures.

8. CRACKING DUE TO CHEMICAL PHENOMENA

The durability of all concrete and reinforced-concrete structures can be jeopardized by certain chemical phenomena.

Sulphates in the waters and soils in contact with the concrete produce deterioration owing to the increase in volume generated by the formation of ettringite. Ettringite arises through the reaction of calcium sulphate, resulting from the contact of sulphate ion with calcium hydroxide, with the hydration products of the alluminates in the cement.

Three levels of deterioration are recognized: in a first stage the deterioration is seen in the form of a widespread cracking, devoid of any preferential direction: in a second stage the cracking is accompanied by swellings of the cortical layer, which alter the planarity of the surface and increase the width of the cracks, and the third and last stage features the detachment and spalling of the cortical layer.

To prevent sulphate attack the following are the preferred measures:

— the use of low-alluminate-content cements (the so-called sulphate-resistant cements, see UNI 9607);

la UNI 8981/8 attualmente in preparazione. Poiché il decorso della reazione alcali-aggregato richiede in genere tempi molto lunghi (da qualche mese a qualche decina di anni), il fenomeno si presenta molto insidioso, in quanto comporta il degrado della struttura quando essa è ormai da tempo in pieno servizio.

Sull'espansione da ASR influiscono positivamente i seguenti accorgimenti:

— impiegare aggiunte a base di silice reattiva: in questo modo la reazione espansiva viene ripartita in un numero maggiore di punti, minimizzando quindi l'effetto globale; inoltre aumentare sensibilmente il contenuto di questo materiale riduce la concentrazione di ione idrossido nella soluzione acquosa dei pori della pasta cementizia. Per queste ragioni è raccomandato l'uso di cemento pozzolanico o d'altoforno;

— impiegare additivi aeranti: la presenza di bolle d'aria costituisce una possibilità di sfogo per il gel alcalino che si viene a formare, riducendo così l'entità dell'espansione;

— favorire condizioni di esercizio tali da facilitare l'asciugarsi del conglomerato o utilizzare prodotti protettivi superficiali impermeabilizzanti. In caso di strutture importanti non si dovrebbero usare aggregati reattivi.

9. FESSURE DOVUTE ALLA CORROSIONE DEI FERRI

La causa più frequente di degradazione delle strutture in cemento armato è senza dubbio la corrosione dell'armatura. Essa è dovuta all'interazione elettrochimica dei metalli con l'ambiente che li circonda, con formazione di pile o celle elettrolitiche, ed è un fenomeno caratterizzato da una particolarità: i prodotti di reazione occupano un volume maggiore del metallo da cui provengono. Questo aspetto è importantissimo specialmente per le barre d'armatura nel calcestruzzo indurito, poiché essendo l'aumento di volume contrastato dal materiale circostante, si generano delle forze che possono provocare la rottura dello stesso.

Le armature nel calcestruzzo si trovano generalmente in condizioni di passività, cioè il ferro si ricopre di un ossido denso, compatto ed aderente al sottostante supporto di ferro metallico, che creando una barriera scarsamente permeabile all'ossigeno ed all'umidità, lo porta in condizioni caratterizzate da una velocità di corrosione così lenta, da ritenerla trascurabile⁽²⁾. Non appena però tale condizione viene alterata, a causa della riduzione del pH della pasta di cemento dovuta alla carbonatazione (la reazione degli idrossidi presenti nella pasta di cemento con la CO₂ dell'aria) o della presenza di cloruri, inizia a formarsi un tipo di ossido di ferro idrato, di elevato volume specifico, che causa sul calcestruzzo circostante tensioni di compressione ed alla superficie dell'elemento costruttivo tensioni di trazione. Di conseguenza si formano fessure che corrono parallelamente ai ferri di armatura superficiali e che si ampliano progressivamente fino al distacco di scaglie di conglomerato (Foto 10). Poiché la fessurazione da corrosione per manifestarsi richiede generalmente tempi molto lunghi (anni) quando si evidenziano le prime lesioni la struttura si trova già in uno stato di degrado più o meno avanzato.

I manufatti più soggetti alla fessurazione da corrosione sono quelli che vengono in contatto con i cloruri (ambiente marino o impiego di sali disgelanti) e quelli che si trovano in con-

— the choice of a suitable W/C ratio to establish a proper degree of permeability of the concrete and therefore the speed of attack (see UNI 8981/2).

Some aggregates contain forms of reactive silica, which, reacting with the alkalies in the cement matrix (alkali-silica reaction, ASR), cause considerable deterioration. The deterioration may be displayed in distinct forms. In the case of massive structures containing a sizeable amount of reactive aggregates distributed homogeneously throughout the concrete, the deterioration generally consists of a diffuse "map cracking" accompanied by swelling, especially in the areas most exposed to ambient humidity. In the case of reinforced structural members (Photo 9), linear cracks form parallel to the member's long side (for example in columns cracks form on the mid-section of the vertical faces). The cracks feature widths as high as several millimetres. If instead only small amounts of reactive aggregates are present, located nearby the surface exposed to moisture, the deterioration is exhibited in the raising and subsequent expulsion of a small disc of concrete that surrounds the reactive aggregate (popout): this matter is dealt by UNI 8981/8, actually under preparation.

Since the development of the alkali-aggregate reaction in general demands very long times (from months to decades), the phenomenon is insidious, since it produces the deterioration of the structure when it has been in service for some time.

The following expedients can help to fight ASR expansion:

— the use of additions having a reactive silica base; in this way the expansive reactions are distributed over a larger number of points, thus minimizing the overall effect. Furthermore, sensibly increasing the content of this material reduces the concentration



Foto/Photo 10 - Fessurazione dovuta alla corrosione dell'armatura/Cracking due to corrosion of reinforcement.

⁽²⁾ «Il calcestruzzo - materiali e tecnologia», di V. Alunno Rossetti - Ed. Mc Graw-Hill (1995), pag. 292.

dizioni ambientali variabili, cioè in condizioni in cui si alternano periodi asciutti, durante i quali si ha carbonatazione, e periodi in cui il manufatto esposto alle precipitazioni si satura d'acqua, permettendo il procedere della corrosione.

Contro il fenomeno della corrosione la UNI 8981, in modo molto generico, raccomanda calcestruzzi con elevata impermeabilità e compattezza (ottenuti impiegando un adeguato dosaggio di cemento e basso rapporto a/c), un limitato contenuto di ione cloro nei diversi componenti dell'impasto ed una distribuzione granulometrica continua.

Il Decreto Ministeriale del 1996 dà indicazioni per garantire la durabilità delle opere in calcestruzzo armato. Tale Decreto fa riferimento alle Norme UNI 9858 e all'Eurocodice 2 (UNI ENV 1992).

La UNI 9858, più dettagliata della UNI 8981, assegna in funzione della classe di esposizione i valori per il massimo rapporto a/c ed il minimo dosaggio di cemento.

L'Eurocodice 2, fa riferimento alla ENV 206 (e quindi alla UNI 9858 che ne costituisce la versione italiana) e fornisce precise indicazioni sul ricoprimento minimo di tutte le armature in funzione delle classi di esposizione.

of hydroxide ion in aqueous solution in the pores of the cement paste. For these reasons the use of slag or pozzolana cement is recommended:

— the use of air-entraining admixtures: the presence of air bubbles provides room for expansion of the alkaline gel that is formed, thus reducing the amount of uncontrolled expansion;

— the arrangement of conditions of service such as to favour the drying of the conglomerate or else the use of waterproofing surface protection products.

In case of very important structures, non reactive aggregate should be used.

9. CRACKING DUE TO THE CORROSION OF THE STEELS

The most frequent cause of the deterioration of reinforced-concrete structures is certainly the corrosion of the reinforcement. It owes to the electrochemical interaction of the metal with its surrounding environment, with the formation of galvanic elements or electrolytic cells, and it has a particular feature: the products of reaction take up a volume larger than that of the metal from which they come. This is very important, especially for the reinforcing bars in hardened concrete, since the increase in volume is resisted by the surrounding material, and forces are thus generated that can cause breakage of the object.

The reinforcement in concrete generally lie in a passive condition, that is, the steel is covered with a dense compact oxide that adheres to the underlying metallic steel support. The resulting creation of a barrier difficultly permeable to oxygen and moisture brings about a condition in which the speed of corrosion is so slow as to be negligible⁽²⁾. But as soon as this condition is altered, owing to the reduction of the cement paste pH due to carbonation (the reaction of the hydroxides in the cement paste with the CO₂ in the air) or owing to the presence of chlorides, a type of hydrated iron oxide of high specific volume begins to form, which causes compression stresses in the surrounding concrete and tractional stresses on the surface of the construction member. As a consequence cracks form that run parallel to the surface reinforcing steel, which progressively increase to the point where scales of concrete detach (Photo 10). Since corrosion cracking generally demands very long times (years) to be manifested, when the first cracks appear the structure is already in a more or less advanced state of deterioration.

The structures most subject to corrosion cracking are those in contact with chlorides (sea environment or regions where salts are used to thaw ice) and those built in variable environments, that is with climate conditions in which dry periods (during which there is carbonation) alternate with periods when the element is exposed to rain and saturates with water, permitting corrosion to proceed.

UNI 8981, in a very generic manner, recommends against this corrosion the use of compact low-permeability concretes (obtained by using a suitable cement content and a low W/C ratio), a limited chloride-ion content in the various mix components and a continuous grading curve.

The 1996 ministerial decree provides indications for assuring the durability of reinforced-concrete works. This decree refers to UNI standards 9858 and to Eurocode 2 (UNI ENV 1992).

The UNI 9858 standard, more detailed than the UNI 8981, gives values for the maximum W/C ratio and the minimum cement content as a function of exposure class.

TABELLA 2/TABLE 2

RIEPILOGO DELLA TIPOLOGIA DELLE FESSURE
SUMMARY OF CRACK TYPES

Tipo di fessura Type of crack	Tempo Time	Forma e orientazione Form and orientation	Manufatti prevalentemente interessati Concrete objects most often affected
Ritiro plastico Plastic shrinkage	Ore Hours	A piede di corvo o lineari sui ferri Crow's foot or linear along the rebars	Solette, pavimentazioni, platee Slabs, flooring, rafts
Fessure da assestamento Settlement cracking	Allo scassero On striking the forms	Parallele alla superficie di getto Parallel to the pour surface	Getti armati Reinforced pours
Espansione termica Thermal expansion	Allo scassero On striking the forms	Parallele al lato lungo e lineari sui ferri Parallel to the long side and linear along the bars	Plinti, pile piene, dighe Footings, full-section piers, dams
Ritiro termico Thermal shrinkage	1-2 giorni 1-2 days	Lineari e parallele al lato corto Linear and parallel to the short side	Muri, rivestimenti di gallerie, pareti di serbatoi, lastre con spessori di 40 cm o più Walls, tunnel linings, tank walls, slabs thicker than 40 cm
Ritiro da essiccamento Drying shrinkage	Variabile Variable	Parallele al lato corto Parallel to the short side	Muri e pavimenti Walls and floors
Fenomeni chimici Chemical phenomena	Mesi o anni Months or years	Parallele al lato lungo o a carta geografica Parallel to the long side or "map"-type	Tutti Everything
Corrosione dell'armatura Corrosion of the reinforcement	Anni Years	Lineari sui ferri Linear along the reinforcement	Manufatti esposti a condizioni ambientali variabili Objects exposed to variable weather conditions
Azioni meccaniche Mechanical forces	In qualsiasi momento At any time		Tutti Everything

⁽²⁾ V. Alunno Rossetti «Il calcestruzzo: materiali e tecnologia» McGraw-Hill (1995) p. 292.

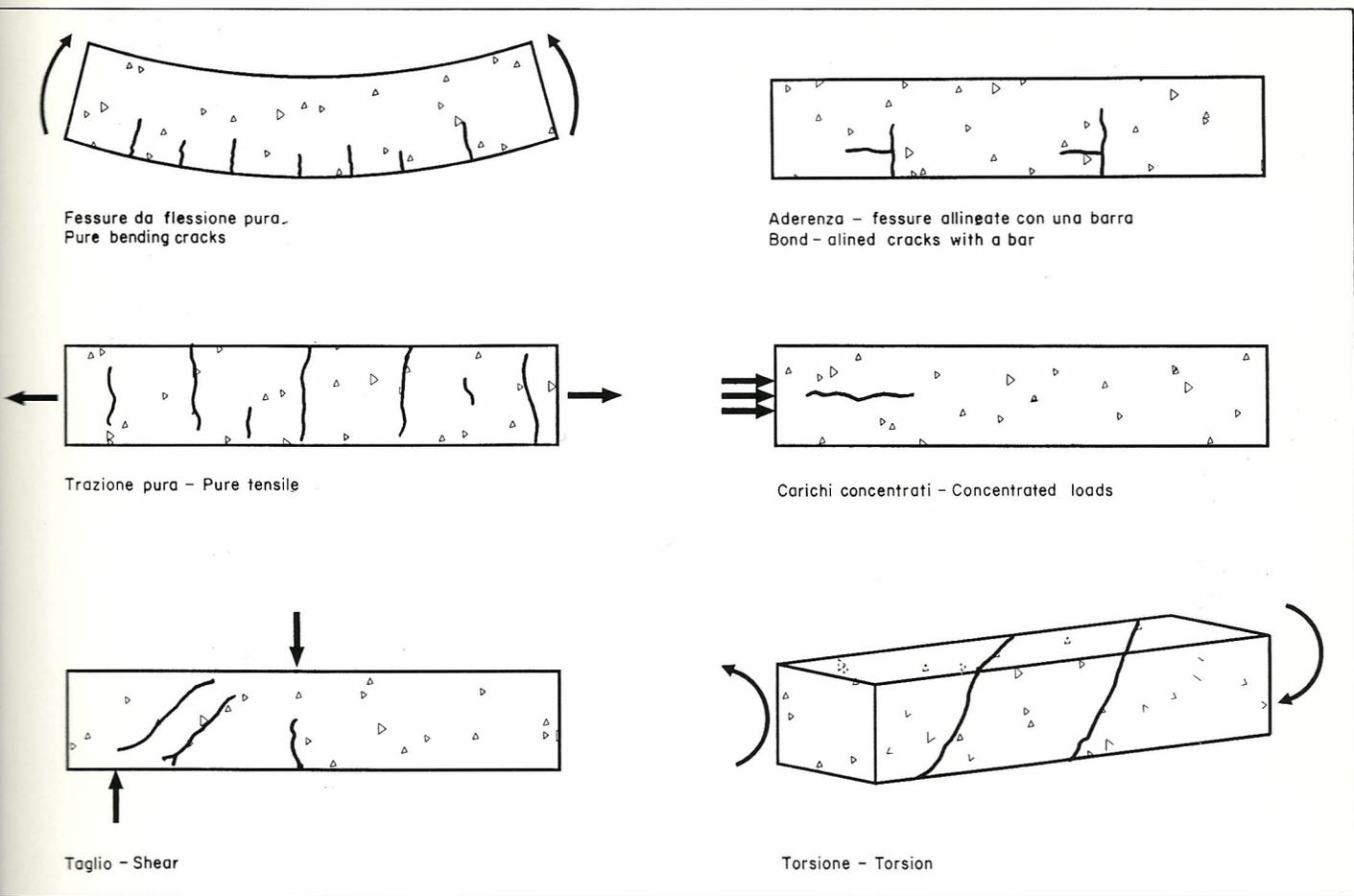


Fig. 1 - Fessure indotte dai carichi/Load-induced cracking.

Altri accorgimenti specialistici a cui si può far ricorso per limitare o ritardare i fenomeni di corrosione sono:

- controllare l'assenza di correnti vaganti;
- aggiungere nell'impasto sostanze come cromati, nitriti o particolari prodotti organici, che agiscono da inibitori di corrosione e di cui si sia verificata l'efficienza;
- rivestire il calcestruzzo con protettivi superficiali;
- ricorrere a metodi di protezione catodica.

10. FESSURE DOVUTE AD AZIONI MECCANICHE

La tipologia di queste fessure, ampiamente esaminate dalle norme precedentemente citate, ma non trattate nella presente nota, è riassunta nella Fig. 1 dedotta dal Manuale del CEB Bulletin n. 148.

11. CONCLUSIONI

La fessurazione nel calcestruzzo e nel cemento armato, è sicuramente un problema complesso e di non facile soluzione, essendo le cause della formazione di fessure molteplici e richiedendo ciascun tipo di fessura diverse metodologie di prevenzione (Nella Tabella 2 sono riassunte le caratteristiche delle fessure esaminate nella presente nota; la tabella è utilizzata a fini diagnostici). Combattere la fessurazione tuttavia, è uno strumento indispensabile per giungere alla realizzazione di opere durabili.

Eurocode 2 refers to the ENV 206 code (and therefore to UNI 9858 which forms its Italian version) and supplies definite indications on the minimum cover of all reinforcing steel as a function of exposure class.

Other specialistic expedients that can be resorted to limit or delay corrosion are:

- checking that stray currents are absent;
- the addition to the mix of substances like the chromates or nitrites or special organic products that act as corrosion inhibitors, whose efficacy has been verified;
- cladding the concrete with protective surface linings;
- cathodic protection methods.

10. CRACKING DUE TO MECHANICAL FORCES

The types of these cracks, extensively considered by the standards mentioned above, are not dealt with in this paper; they are summarized in Fig. 1 of the Manual of CEB Bulletin no. 148.

11. CONCLUSION

The cracking of concrete and reinforced concrete is surely a complex problem, one not easily solved, since the causes of crack formation are many and since each type of crack demands different prevention methods (Table 2 summarizes the characteristics of the cracks considered in this paper; the table can be used for diagnostic purposes). But in order to have durable concrete works, it is indispensable that cracking be prevented or minimized.