

# ATTACCO SOLFATICO ED EFFETTI STRUTTURALI

---

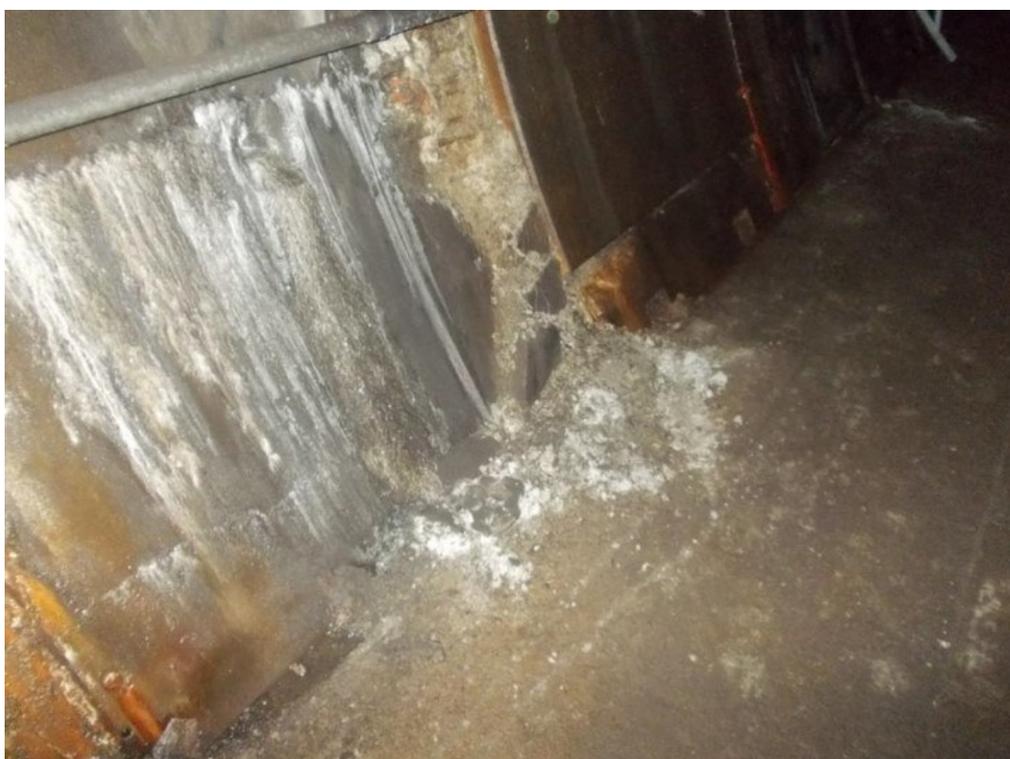
*Matteo Felitti, ENGINEERING & CONCRETE CONSULTING – Università degli Studi di Napoli – Federico II*

## PREMESSA

Obiettivo del seguente documento è quello di fornire – in estrema sintesi – un quadro generale sulle possibili interazioni tra effetti chimico-fisici sul materiale ed effetti meccanici sulle strutture in calcestruzzo armato, relativamente, in questo caso, all'azione dei solfati.

## ASPETTI CHIMICO-FISICI

Nei terreni e in diverse rocce sono presenti sali solubili in concentrazioni più o meno significative. Tra questi risultano comunemente presenti i solfati, come ad esempio il solfato sodico ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), sotto forma di sali idrati e il solfato di calcio sotto forma di gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A contatto con acqua questi sali – in funzione della loro solubilità – si sciolgono. Per questo motivo, sia nelle acque che permeano i terreni, sia nei corsi d'acqua e nel mare sono presenti gli ioni solfato ( $\text{SO}_4^-$ ). Questi ultimi, se a contatto con il calcestruzzo, sono in grado reagire con alcuni composti presenti nella pasta cementizia provocandone una alterazione chimica a livello di materiale (espansione e fessurazione) con conseguente danneggiamento della sezione fino a coinvolgere l'intero elemento strutturale (Figg.1-4).



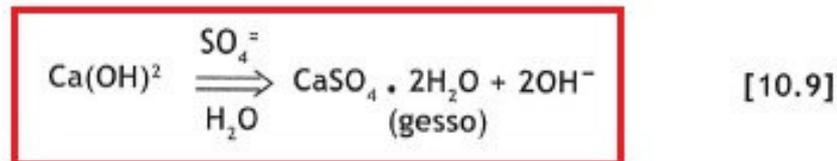
**Figura 1** – Degrado da attacco solfatico in una galleria del nord Italia



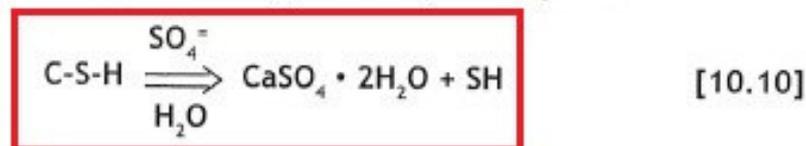
**Figura 2** – Degrado da probabile attacco solfatico in una trave realizzata in uno stabilimento del sud America

sul calcestruzzo armato”, Atti Giornate AICAP 1981, Strutture Marittime, Ravenna, maggio, (1981); disponibile su [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) → Ricerca e Pubblicazioni → Pubblicazioni scientifiche Degrado, durabilità e restauro delle strutture in calcestruzzo → Articolo N. 8.

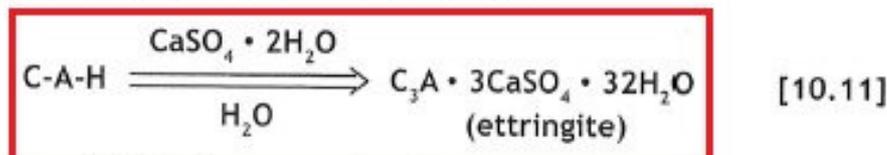
Lo ione  $\text{SO}_4^{=}$  può essere presente nei terreni e nelle acque a contatto delle strutture in calcestruzzo (fondazioni, gallerie, pali, tubazioni interrate, vasche, piscine, opere marittime, ecc.). È indispensabile, comunque, la presenza di acqua per il trasporto dello ione  $\text{SO}_4^{=}$  dal terreno all'interno del calcestruzzo attraverso i pori capillari o altri vuoti (microfessurazioni o macrovuoti). La prima azione dello ione  $\text{SO}_4^{=}$  è quella di interagire con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e/o  $\text{C-S-H}$  per produrre il gesso:



La reazione [10.9] provoca fenomeni di rigonfiamento e delaminazione superficiale per la trasformazione di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nel più voluminoso gesso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . L'attacco solfatico può anche provocare un calo di resistenza meccanica e di adesione a causa del processo di **decalcificazione** (perdita di calcio) che, dopo la trasformazione di tutta la calce in gesso secondo l'equazione [10.9], coinvolge anche il  $\text{C-S-H}$ , il prodotto cui si devono principalmente le prestazioni meccaniche del calcestruzzo (§ 3.5), secondo l'equazione [10.10]. La perdita di calcio del  $\text{C-S-H}$  comporta, appunto, la perdita di resistenza meccanica per la trasformazione del  $\text{C-S-H}$  in  $\text{S-H}$  (silice idrata) priva di capacità legante:



Il gesso prodotto secondo i processi [10.9] e [10.10] può, a sua volta, reagire con gli alluminati idrati ( $\text{C-A-H}$ ) e formare **ettringite**:



La formazione di ettringite provoca rigonfiamenti, delaminazioni, fessurazioni e distacchi (Fig.10.18) per l'**aumento di volume associato alla reazione** [10.11]. Questo tipo di ettringite è definita **secondaria** per essere distinta dall'ettringite **primaria** che si forma, invece, per reazione degli alluminati anidri ( $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ) con l'acqua ed il gesso finemente macinato aggiunto per regolare la presa del cemento (§ 3.4). A differenza dell'ettringite **secondaria**, quella **primaria** non provoca alcun danno, anzi agisce utilmente attraverso una barriera attorno agli alluminati e rallentandone l'idratazione (Fig. 3.3a).

**Figura 3** – Nel rettangolo rosso sono evidenziate le seguenti reazioni chimiche: [10.9] Lo ione solfato reagisce con l'idrossido di calcio per formare gesso; [10.10] Trasformazione del C-S-H in silice idrata; [10.11] Formazione di ettringite secondaria (Fonte: Mario Collepardi et al. Il Nuovo Calcestruzzo, settima edizione, 2022)

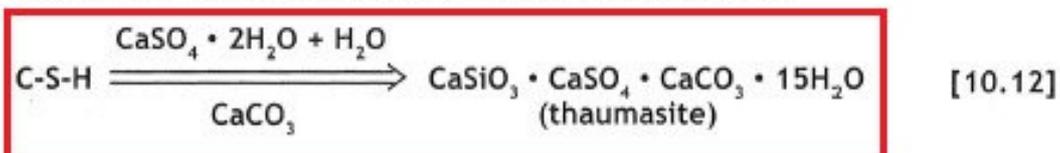
Il diverso comportamento dell'ettringite *secondaria* (che provoca rigonfiamenti, fessurazioni e danni) e di quella *primaria* che non provoca danni dipende sostanzialmente da due concomitanti aspetti:

- l'ettringite *primaria* si forma **omogeneamente** (per la uniforme distribuzione del gesso finemente macinato) ed **immediatamente** (*EEF, Early Ettringite Formation*), quando ancora il calcestruzzo in fase di presa è plastico: pertanto, le tensioni sono modeste per la deformabilità del calcestruzzo e comunque uniformemente distribuite;
- l'ettringite *secondaria* si forma, invece, **eterogeneamente** (nell'interfaccia calcestruzzo/ambiente ma non dentro il calcestruzzo) e dopo un certo tempo (*DEF, Delayed Ettringite Formation*), quando il calcestruzzo - dopo mesi o anni dal getto - è ormai molto rigido: pertanto, l'espansione che accompagna la formazione di ettringite *secondaria* provoca tensioni che sono tanto più elevate, quanto maggiore è il modulo elastico del calcestruzzo; inoltre, e questo è l'aspetto più importante, queste tensioni non sono uniformemente distribuite ma si concentrano nella parte corticale della struttura a contatto con i solfati dove si forma l'ettringite (Fig. 10.18), mentre sono assenti nella parte interna delle strutture.

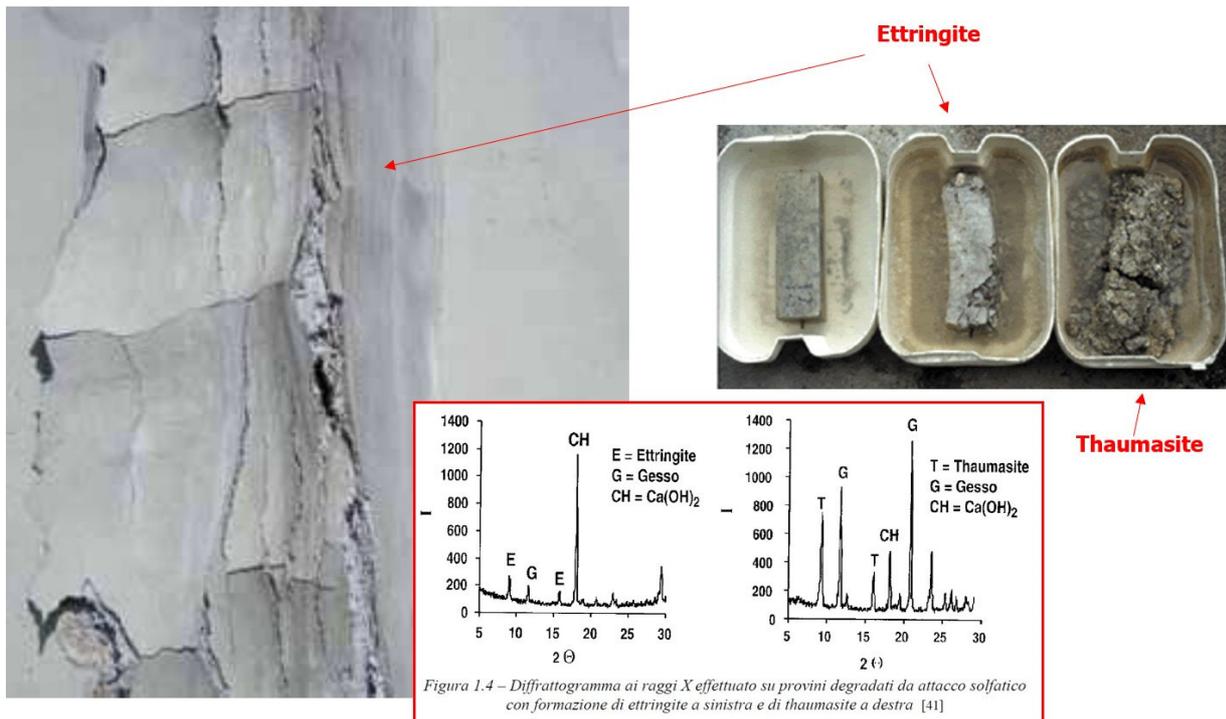


Fig.10.18 - Pareti di un canale in calcestruzzo dopo la rimozione di acqua solfatica

In particolari condizioni climatiche (fredde e umide sotto 10°C con UR>95%) ed in presenza di CaCO<sub>3</sub> finemente disperso nella pasta cementizia, l'attacco solfatico si esplica attraverso la formazione di **thaumasite**:



La formazione di thaumasite secondo il processo [10.12] è il più devastante tra tutti gli attacchi solfatici: ciò dipende dalla perdita di resistenza meccanica e di adesione in conseguenza della *decalcificazione* che si accompagna alla perdita di C-S-H. Nella Fig. 10.19 è mostrato il tipo di degrado (spappolamento)



**Figura 5** – A sinistra della figura un elemento strutturale soggetto ad attacco solfatico, a destra è riportato un test sperimentale dove si nota il danneggiamento dei provini di calcestruzzo a contatto con i solfati ed in basso è riportato un diffrattogramma ai raggi X in cui si nota la presenza di ettringite e thaumasite nel campione esaminato (Fonte: Mario Collepari et al. Il Nuovo Calcestruzzo, settima edizione, 2022)

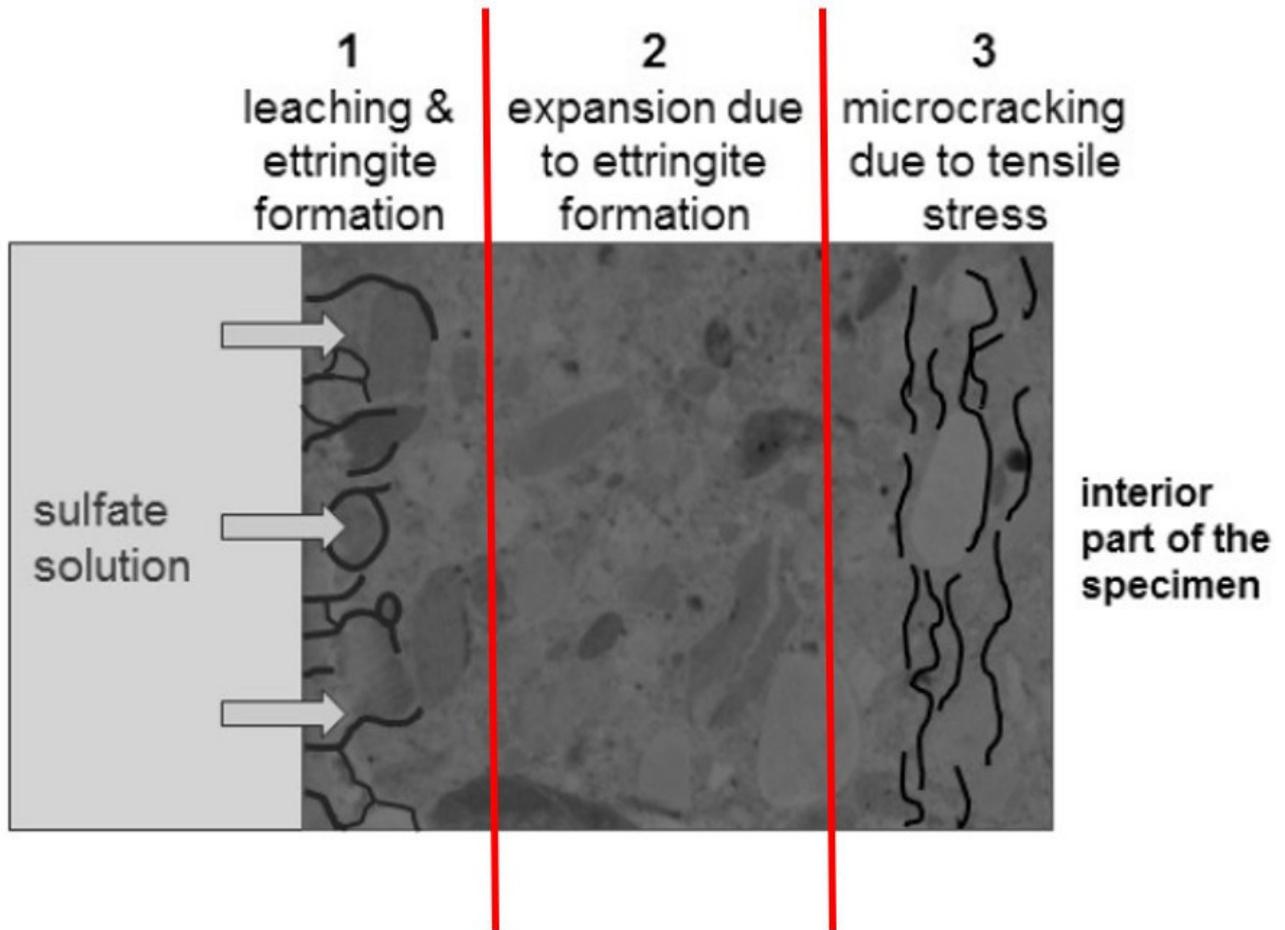
## ASPETTI STRUTTURALI

In merito alle conseguenze strutturali dell'azione espansiva e dirompente dei solfati a contatto con il calcestruzzo, di seguito si descrive un caso studio che mette in evidenza tale problematica. L'obiettivo dello studio è stato quello di accoppiare – teoricamente - la parte chimica con quella meccanica. Inoltre, sono state eseguite prove sperimentali su elementi strutturali - in scala – con e senza reazione solfatica, allo scopo di tarare le analisi numeriche. Si riportano, pertanto, alcune immagini commentate tratte dal seguente articolo (al quale si rimanda per ulteriori approfondimenti):

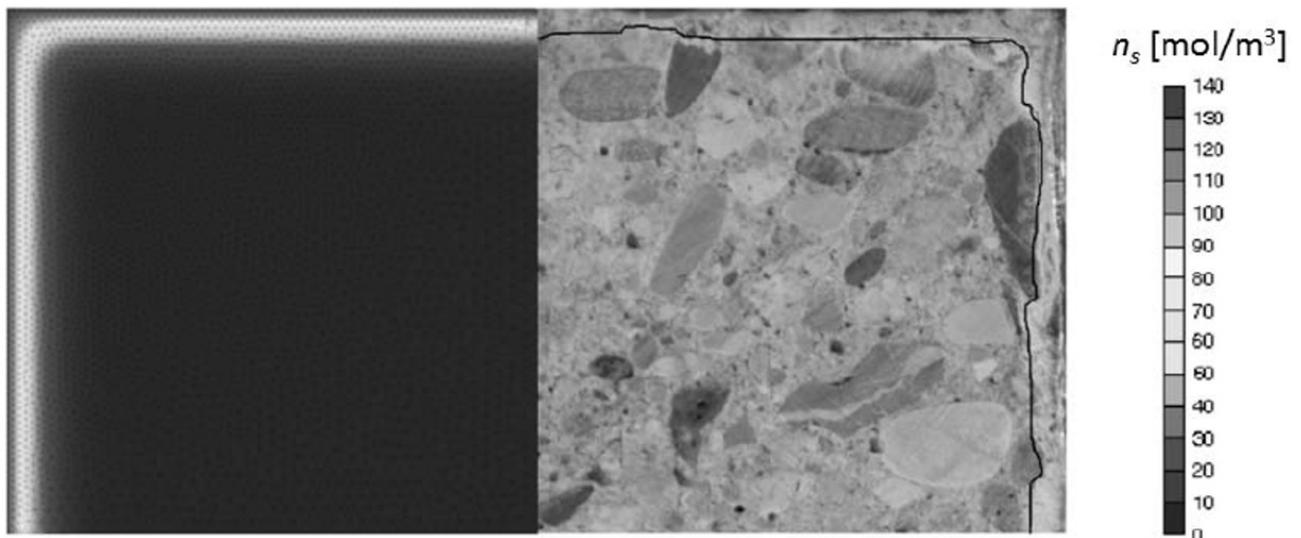
### Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete

Nicola Cefis<sup>a</sup>, Claudia Comi<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano  
Piazza Leonardo da Vinci, 32, 20133 Milano (Italy)

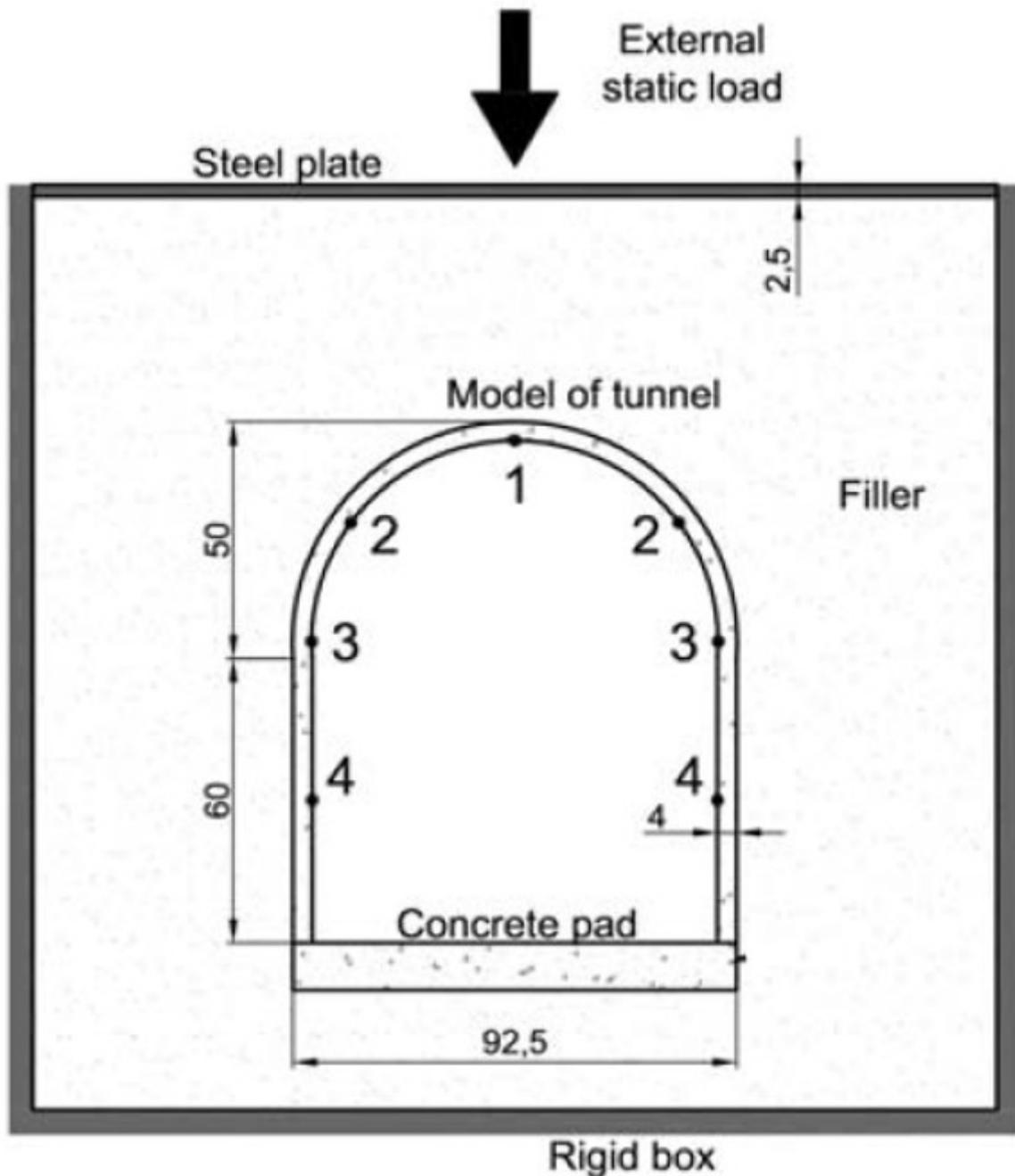


**Figura 6** – Rappresentazione schematica dell'ingresso dello ione solfato nel calcestruzzo. Zona 1: formazione di ettringite; zona 2: espansione; zona 3: fessurazione (Fonte: N. Cefis, C. Comi, Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete – modificata dall'autore)

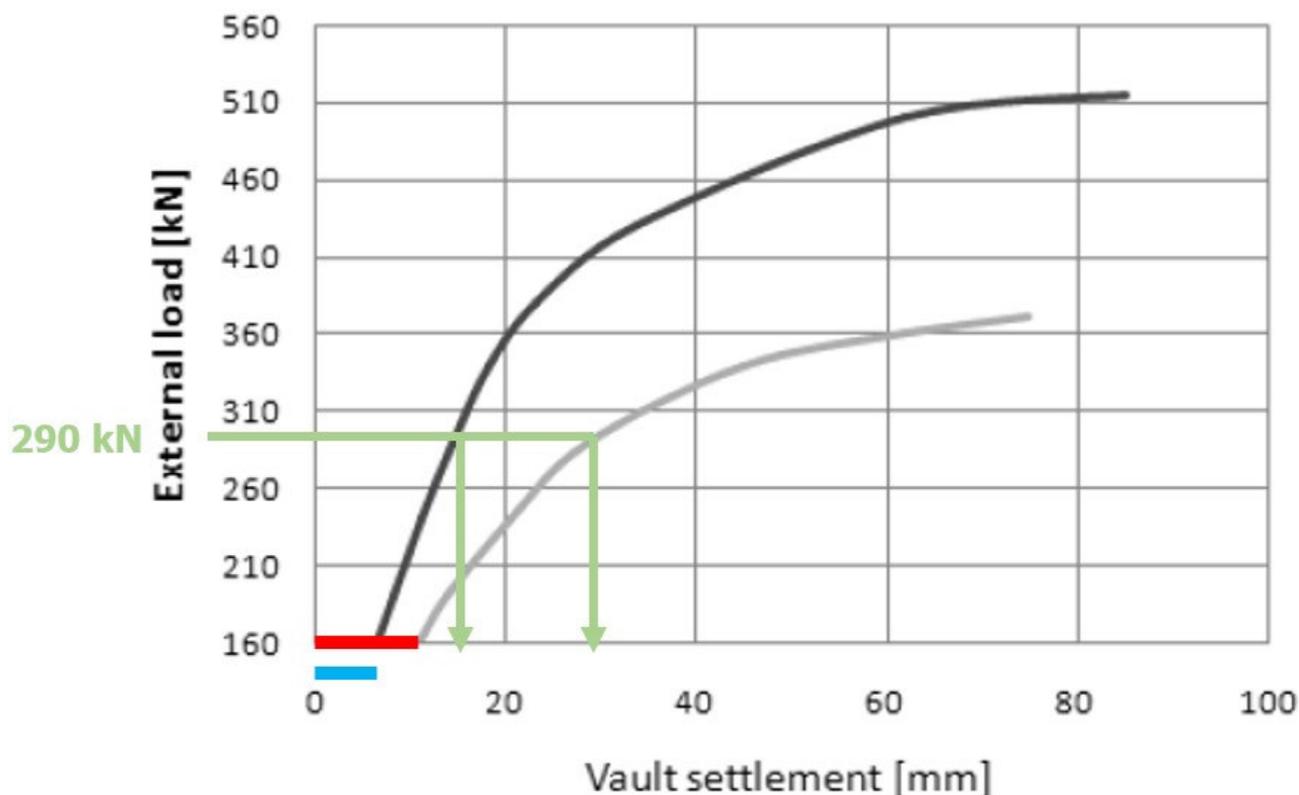


**Figura 7** – Penetrazione dei solfati dopo 400 giorni di esposizione ad una soluzione Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10%: a sinistra la simulazione numerica, a destra il profilo sperimentale (Fonte: N. Cefis, C. Comi, Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete)

La valutazione della capacità residua in un rivestimento in c.a. di una galleria è stata eseguita su un prototipo sperimentale in scala 1:10 in ambiente a temperatura ed umidità controllata. Il terreno a contatto con il calcestruzzo è stato contaminato con una soluzione al 5% di solfato di sodio. La curva di capacità è stata tracciata a partire da un carico di 160 kN (Fig. 8).



**Figura 8** – Test sperimentale su rivestimento di galleria in scala 1:10 (Fonte: N. Cefis, C. Comi, Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete)



**Figura 9** – Curve di capacità su struttura integra e struttura soggetta ad attacco solfatico. Il tratto in rosso indica lo spostamento della calotta degradata al carico iniziale di 160 kN, il quale risulta maggiore dello spostamento a tratto azzurro della calotta integra (Fonte: N. Cefis, C. Comi, Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete – modificata dall'autore)

Dalla figura 9 si nota una notevole differenza di comportamento sotto carico della struttura soggetta ad attacco solfatico (curva grigia) rispetto alla struttura integra (curva nera): al passo di carico pari a 290 kN, ad esempio, la struttura degradata presenta spostamenti di gran lunga maggiori rispetto alla struttura integra. Inoltre è evidente un drastico calo delle resistenze globali nella struttura danneggiata dai solfati (curva grigia).

## CONCLUSIONI

In questo breve articolo si è voluto mettere in evidenza una possibile correlazione tra gli aspetti più propriamente chimico-fisici, legati all'azione dei solfati sulla pasta cementizia, con gli aspetti meccanici che coinvolgono – di conseguenza - la sezione e l'elemento strutturale in c.a. Si è visto, infatti, che le strutture danneggiate dai solfati presentano una riduzione della capacità portante rispetto alle strutture integre a pari condizioni.

## APPROFONDIMENTI

- Colleparidi M. et al., Il nuovo calcestruzzo, settima edizione, Ed. Trevisostampa, 2022;
- La durabilità delle strutture, a cura di Roberto Marino, Calcestruzzi SpA;
- M. Felitti, L.R. Mecca, Il degrado delle strutture in calcestruzzo armato, Maggioli Editore, 2018;
- N. Cefis, C. Comi, Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete – modificata dall'autore – Politecnico di Milano;
- The mechanisms of sulfhate attack in concrete, H. Muhammad Nadir, and Ash Ahmed;

## ARTICOLO INTERNAZIONALE

### Attacco solfatico, introduzione tradotta in italiano:

L'azione dei solfati fa avviare una serie di processi chimici e fisici correlati. Si tratta di un attacco ai prodotti di idratazione del cemento, che danno luogo alla formazione di composti espansivi principalmente, ettringite e gesso, provocando inoltre un incremento del volume della matrice cementizia e conseguente fessurazione. Quando tali prodotti raggiungono una certa quantità nel calcestruzzo, le prestazioni di adesione tra pasta di cemento e aggregato si riducono. Si è visto che l'attacco solfatico influisce sulla resistenza a compressione e, quindi, sul modulo elastico del calcestruzzo.

Dopo l'attacco, le fessurazioni si propagano nel calcestruzzo, degradando le proprietà della sezione trasversale delle strutture in calcestruzzo armato provocando, inoltre, una accelerazione dei processi corrosivi in atto nelle armature.

## Creep, chloride, carbonation and sulphate attack on concrete

**B. Murali Krishna<sup>1\*</sup>, P. Sai Asrith<sup>2</sup>, and T.P. Tezeswi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, VNR VJIET, Hyderabad, India.*

<sup>2</sup> *UG Student, Department of Civil Engineering, NIT Warangal, Warangal, India.*

<sup>3</sup> *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, NIT Warangal, Warangal, India.*

### LINK ARTICOLO:

[https://www.researchgate.net/publication/359143818\\_Creep\\_chloride\\_carbonation\\_and\\_sulphate\\_attack\\_on\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/359143818_Creep_chloride_carbonation_and_sulphate_attack_on_concrete)