

Giulia Baronio
Luigia Binda
Giuliana Cardani
Elsa Garavaglia
Cristina Tedeschi

Approccio sperimentale sistematico e modellazione probabilistica del degrado delle murature

A systematic experimental approach and probabilistic modelling of masonry decay

The literature concerning the chemical-physical decay and processes of natural building stones subject to aggressive environments is very wide and deeply developed at macro and micro structural level. On the contrary the research carried out on the durability of masonry as a composite material and on the mutual influence of its components (mortar, brick/stone), is much less rich. Nevertheless the results of recent research have shown that in order to study and understand the decay phenomena due to salt crystallisation and frost/defrost action the experimental accelerated ageing tests should be carried out on masonry specimens and not on the single components. Since the end of the seventies the (Research Unit) of DIS, Politecnico has followed a systematic methodology for the study of the damage caused to masonry by salt crystallisation.

A synthetic report of this methodology and of the obtained results is given below. The decay of masonry is highly influenced by the environment aggressivity and by the combination of the masonry constituents. The different types of decay were defined within an EC Contract (EV5V-CT92-0108) and collected in a Damage Atlas. A product of the same Contract was an expert system (MDDS) on the decay and diagnosis of brick masonry prepared with the aim of helping non expert professionals in the interpretation of the decay mechanisms. During a first phase of the research on the basis of the state diagrams of the most diffused and harmful salts a cyclic ageing crystallisation test has been set up for the single masonry components ▶

La letteratura relativa ai processi e alla misura dell'alterazione chimico-fisica dei materiali lapidei in ambiente aggressivo è molto ampia ed approfondita sia a livello di macro che di micro-struttura. Al contrario la ricerca sulla durabilità della muratura intesa come materiale composito e sulla mutua influenza che si verifica tra i suoi componenti (malta e mattone/pietra) è molto meno ricca. Tuttavia è ormai dimostrato come ai fini dello studio e della comprensione dei fenomeni di degrado dovuti alla cristallizzazione salina ed al gelo/disgelo sia più attendibile condurre prove di invecchiamento accelerato su provini di muratura anziché sui singoli componenti (mattoni, pietre, malte). Sin dalla fine degli anni settanta l'Unità di Ricerca del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano ha seguito una metodologia sistematica d'approccio allo studio del danno causato alla muratura dalla cristallizzazione salina; di tale metodologia e dei risultati concreti raggiunti viene offerta di seguito una breve sintesi.

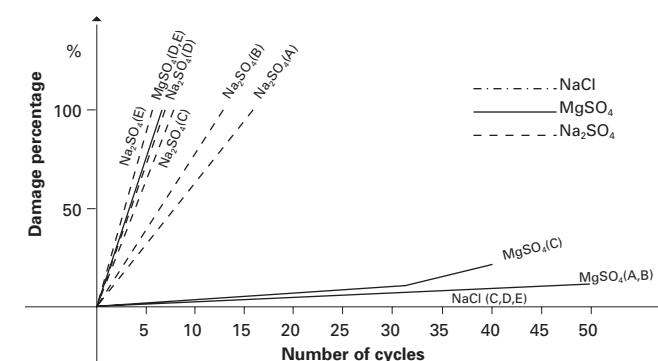
Il degrado della muratura è fortemente influenzato dall'ambiente aggressivo in cui si trova e dalla combinazione dei suoi elementi costituenti. I diversi tipi di degrado sono stati definiti nell'ambito di un Contratto CEE (EV5V-CT92-0108) nel 1992 e raccolti in un atlante del danno; contemporaneamente si è realizzato un sistema esperto specifico sul degrado delle murature in laterizio con la finalità di aiutare i professionisti non esperti nel settore ad interpretare tali meccanismi di alterazione [1].

In una prima fase della ricerca, sulla base dello studio dei diagrammi di stato dei diversi sali più diffusi nelle murature (NaCl, MgSO₄, Na₂SO₄), è stata messa a punto in laboratorio una prova ciclica di cristallizzazione salina sui singoli componenti seguendo due modalità differenti: 1) per immersione totale in soluzione salina, più adeguata per studiare elementi isolati come colonne e decorazioni; 2) per risalita capillare di soluzione salina, più adatta per elementi strutturali di grandi dimensioni, dove il degrado non può raggiungere la parte centrale dell'elemento. Dopo la contaminazione gli elementi sono stati esposti a temperature e U.R. prescelte [2] per tempi definiti in figura 1[▶]. I cicli sono stati ripetuti fino al danneggiamento del campione. In figura 2[▶] si riporta il danno provocato da diversi sali solubili in condizioni termogravimetriche differenti. Successivamente il Na₂SO₄ è stato scelto per la conduzione di prove sia in sito che in laboratorio, in quanto risulta essere il più aggressivo e quello

1. condizioni termogravimetriche differenti per cicli di cristallizzazione diversi

Salts	Type of cycle
NaCl	A. t ₁ = 2h
MgSO ₄	t ₂ = 46h [50% RH]
Na ₂ SO ₄	B. t ₁ = 2h
	t ₂ = 94h [50% RH]
	C. t ₁ = 2h
	t ₂ = 166h [50% RH]
	D. t ₁ = 2h
	t ₂ = 46h [50% RH]
	t ₃ = 120h [60°C]
	E. t ₁ = 2h
	t ₂ = 46h [50% RH]
	t ₃ = 120h [100°C]

2. danneggiamento (%) della superficie esterna di mattoni provocato dai diversi cicli di cristallizzazione di diversi tipi di sale



che cristallizza più facilmente in natura.

Il danno provocato dalla cristallizzazione è dovuto all'affaticamento del materiale causato dal susseguirsi dei cicli di secco e umido, in presenza di sali solubili all'interno del materiale stesso, che provocano una continua delaminazione dello strato più esterno del materiale [3]. Si osserva però che anche nel caso di superfici molto degradate, le caratteristiche del materiale restano invariate se non per qualche mm di profondità al di sotto dello strato interessato dall'alterazione [figura 3,4,5[▶]]. Pertanto una misura non distruttiva del degrado può essere ottenuta in laboratorio attraverso la diminuzione di altezza del provino a mano a mano che avviene la delaminazione. Le prime misure e valutazioni del danno sono state eseguite con comparatori fissati sulla parte superiore del provino [4].

L'influenza reciproca dei componenti sul degrado da cristallizzazione di sali viene studiata in una prima ricerca svolta su prismi di muratura [5]. La muratura è un composito, pertanto esiste un'interazione tra i componenti la muratura tale per cui i meccanismi di degrado che si verificano in un singolo componente sono influenzati dalle caratteristiche rispettivamente dell'altro componente, in parti-

▶ following two different aims: 1) total immersion in salt solution, able to study the decay of slender elements like columns and decorations, 2) capillary rise of salt solution, more useful for structural elements of large dimensions, when the decay cannot reach the core of the element. After the contamination the specimens were exposed to chosen temperature and RH. The cycles were repeated until the damage of the specimen reached a chosen level. The tests were carried out with different types of salts and different thermo-hygro-metric conditions and different cycle duration. Finally the sodium sulphate was chosen as the most aggressive in the shortest duration of the test.

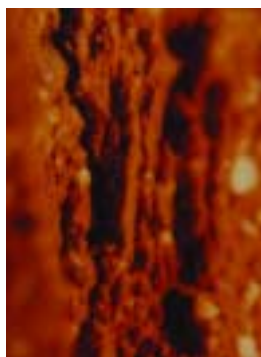
Since a non destructive

technique was required to measure with continuity the material decay, the research allowed to notice that the decay started from the external surface of the material and proceeded cycle by cycle toward the interior, often as a delamination. Furthermore it was detected that the material characteristics below the decayed surface remained unaltered. The first measurements of the surface decay were carried out with gauges applied to the external surface. Then a laser profilometer was adopted as the best tool to measure the decay over time. The mutual influence of the masonry components in the surface damage was first studied on masonry prisms damaged by salt crystallisation. From these first results the decision was taken to

3. alterazione di una muratura esposta all'effetto sinergico di differenti agenti atmosferici



4. fenomeni di affaticamento del mattone nella zona retrostante alla superficie esterna



5. penetrazione del degrado in profondità sotto della superficie deteriorata



6. Profilografo a laser usato in laboratorio

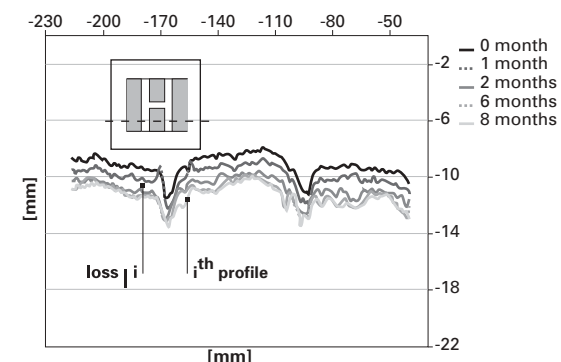


► build full scale models in a polluted area of Milan. In order to accelerate the damage sodium sulphate solution was inserted into the building foundation so that the ageing came by capillary rise. Since 1981 also a photographic survey has been carried out every three to six months on decayed monuments in Milan. The natural environment was also studied evaluating the results given for 10 years by the Brera Observatory in Milan and since 1990 the on site microenvironment is also controlled near the models. The data compared with the equilibrium curve of sodium sulphate showed that the formation of its two phases thenardite and mirabilite can occur in Milan every month of the year and several times a month

with an average duration of 48 hours. By now the laboratory crystallisation test is carried out on masonry prisms according to Rilem recommendation proposed by TNO-Delft and calibrated during three EC contracts also with other partners. A more sophisticated device is introduced to measure the surface decay: the laser sensor which is able to evaluate the surface variation of a material with a laser beam that runs along a surface. Then a suitable data acquisition system transforms these measurements in surface roughness profiles, which describe the decay in function of time and space. The values of the chosen parameter measured over time can constitute the input data for a deterministic or probabilistic ►

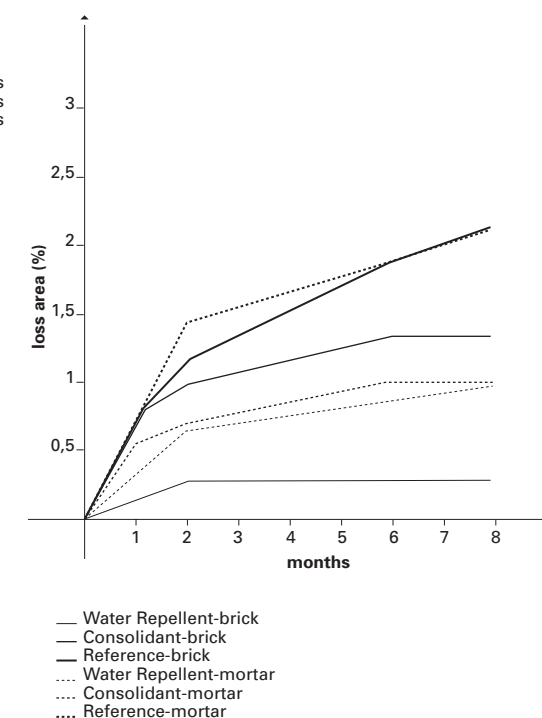
colare dalla porosità. Da tali ricerche nasce l'idea di costruire piccoli edifici in pietra ed in mattone come un laboratorio all'aperto [6], da sottoporre a degrado causato da Na_2SO_4 trasportato in soluzione nelle murature per capillarità dal terreno di fondazione. Contemporaneamente viene svolta un'intensa indagine fotografica per lo studio del degrado superficiale, su diversi monumenti milanesi. L'ambiente naturale con le condizioni di temperatura e U.R. che possono scatenare i meccanismi di degrado vengono dapprima studiati dai dati relativi a 10 anni forniti dall'osservatorio di Brera di Milano e dal 1990 in sito dove sono collocati i modelli fisici. I dati sono stati confrontati con le curve di equilibrio di diversi sali solubili, come i solfati di sodio e di magnesio. Si è osservato che le condizioni che determinano la formazione di thenardite e mirabilite a Milano si realizzano in ogni mese dell'anno e più volte al mese con una durata media di 48 ore. In laboratorio la prova di cristallizzazione salina viene ora condotta su campioni di muratura e non più sui suoi singoli componenti. La prova è stata proposta dal TNO di Delft [7] e calibrata nell'ambito di 3 Contratti CEE anche con altri partner. Si utiliz-

7. profili rilevati nel tempo dal profilografo su un campione di muratura



za inoltre un sistema più sofisticato per quantificare il danneggiamento superficiale, attraverso il profilografo a laser [figura 6']; si tratta di uno strumento in grado di valutare la variazione della rugosità superficiale di un materiale, senza entrare in contatto col materiale stesso, attraverso un raggio laser che percorre la superficie e un sistema di acquisizione computerizzato in grado di tramutare tali rilevamenti in profili di rugosità della superficie che ne descrivono il degrado nello spazio e nel tempo [figura 7']. La quantità di materiale superficiale persa nel tempo può essere assunto come parametro di danno utilizzabile per un modello matematico deterministico o probabilistico che consenta di studiare il comportamento del materiale e di valutare l'efficacia dei trattamenti superficiali in presenza di sali diversi e in diverse quantità. Si riporta in figura 8' un esempio di diagrammi di danneggiamento (percentuale di area persa nel tempo) ottenuti con le misurazioni del profilografo in laboratorio su diversi campioni di muratura in mattoni trattati e non [8]. Dal grafico di figura 8' risulta visibile come in questo caso il trattamento consolidante è inefficace poiché la % di materiale perso è simile a quella del campione non trattato. Nel caso di idro-

8. curva area persa/tempo di un campione di muratura con concentrazione di 2,5% di Na_2SO_4 .



9. muratura in mattoni trattata con idrorepellente con concentrazione 2,5% di Na_2SO_4 dopo il taglio



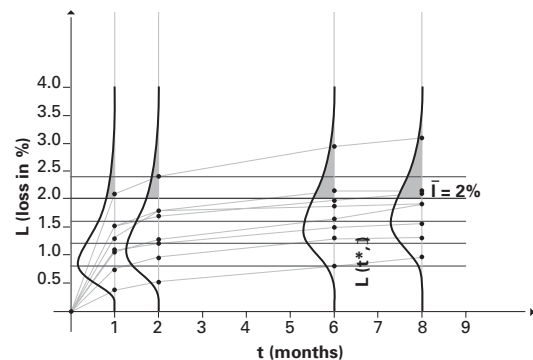
mathematical model to study the material behaviour and the durability of surface treatments in presence of different soluble salts and in different quantities.

The high randomness connected with the material characteristics and with the decay in a natural environment suggests to assume the deterioration process $L(t, \lambda)$ as a stochastic process of the random variables λ and t where λ is the loss of material at the surface in a time t .

This approach was used not only to model the decay mechanisms, but also to reduce the time duration of the accelerated ageing tests and to prevent in this way the occurrence of decay particularly when using surface treatments and/or material substitution. The

results can help in the future in the choice of appropriate repair and protection techniques for external surfaces of historic buildings.

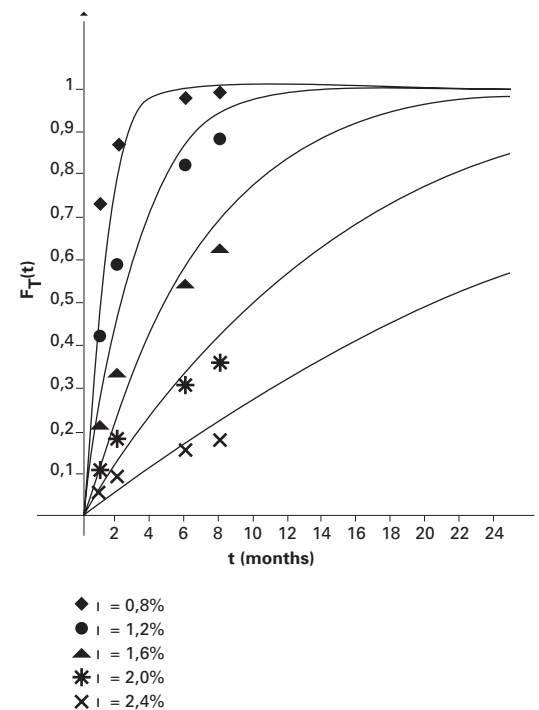
10. interpolazione della curva area persa/tempo con la modellazione del processo di degrado $L(t, \lambda)$ e la probabilità di superamento della soglia $\bar{\lambda}$ (2%)



repellente, il taglio del provino non danneggiato [figura 9] ha mostrato una sottile linea di sali cristallizzati subito sotto lo strato trattato; il danno avrà la probabilità di verificarsi ma in tempi più lunghi.

L'incertezza e la casualità che caratterizzano il degrado di un materiale sottoposto ad azione aggressiva hanno suggerito di affrontare il problema della previsione del danno nel tempo in termini probabilistici, assumendo il processo di degrado $L(t, \lambda)$ come un processo stocastico delle variabili λ e t , dove λ è la quantità di materiale superficiale perso nel tempo t . Poiché i rilevamenti del danno avvengono in istanti discreti di t , per ogni istante di t viene modellata la perdita λ , misurata in mm^2 , con un'appropriata funzione densità di probabilità (p.d.f.) $L(t, \lambda)$ che dipende soltanto da λ (con t come costante). La modellazione è stata effettuata con una Log-Normal p.d.f. [9]. Si affrontata in termini probabilistici anche la quantificazione del tempo di superamento di una determinata soglia di danno, di cui un esempio è riportato nella area tratteggiata riportata in figura 10 per $\bar{\lambda}=2\%$, attraverso la costruzione di appropriate curve di fragilità sperimentali [figura 11]. Per modellare le curve di fra-

11. curve di fragilità per diversi livelli di danno $\bar{\lambda}$ per il campione di muratura trattato con consolidante e con concentrazione 2,5% di Na_2SO_4



gilità sperimentali si è scelta una distribuzione Weibull [9]. La procedura elaborata permette la riduzione dei tempi di prova in laboratorio pur garantendo una soddisfacente previsione di danneggiamento nel tempo. Essa è in grado di fare previsioni anche sull'efficacia di eventuali trattamenti superficiali e/o sostituzione di materiali. Per tanto i risultati possono guidare nella scelta delle tecniche di intervento e di protezione più appropriate per le superfici murarie degli edifici storici.

BIBLIOGRAFIA

[1] Van Balen K., Mateus, J., Binda L., Baronio G., *Scientific background of the Damage Atlas and the Masonry Damage Diagnostic System, Expert System for the Evaluation of the Deterioration of Ancient Brick Structures*, EC Contract EV5V-CT92-0108, Final Report, 1997.

[2] Binda L., Charola A.E., Baronio G., *Deterioration of porous materials due to salt crystallization under different thermohygrometric conditions*, I Bricks, 5th Int. Conf. on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, Suisse, pp. 279-288, 1985.

[3] Binda L., Baronio G., *Mechanisms of masonry decay due to salt crystallization*, J. Durability of Buildings Materials, N.4, Elsevier, Amsterdam, pp. 227-240, 1987.

[4] Binda L., Baronio G., Squarcina T., *Evaluation of the durability of bricks and stones and of preservation treatments*, 7th Int. Congr. on Deterioration and Conserv. of Stone, Lisbona, pp. 753-761, 1992.

[5] Binda L., Baronio G., *Alteration of the Mechanical Properties of Masonry Prisms due to Aging*, 7th IBMaC, Melbourne, Australia, Vol. 1, pp. 605-616, 1985.

[6] Baronio G., Binda L., Cantoni F., Rocca P., *Durability of stone and brickwork protectives and consolidants: experimental research on full-scale models*, 6th Int. Conf. on Durability of Building, Materials and Components, Omiya, Vol.2, pp. 824-833, 1993.

[7] RILEM MS. A.1, *Determination of the resistance of wallettes against sulphate and chloride*, Materials and Structures, 31, pp. 2-19, 1998.

[8] Cardani G., Tedeschi, C., Binda L., Baronio G., *Crystallisation Test on Treated Brick/Stone Masonry Specimens for Damage Evaluation*, Proc. Int. Conf. 9th Durability of Building Materials, 17-20/03/2002, Brisbane, (Australia), CD-ROM, paper 039, 2002.

[9] Garavaglia E., Lubelli B., Binda L., *Two Different Stochastic Approaches Modelling the Decay Process of Masonry Surfaces Over Time*, Materials and Structures, Vol. 35, n.248, pp. 246-256, 2002.