

Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"	Vol. 37 (1999)	pp. 77-91	Trieste 2000
---	----------------	-----------	--------------

MARCO DEL MONTE (***) - PAOLO FORTI (***) - MARCO TOLOMELLI (**)

DEGRADAZIONE METEORICA DEI GESSI: NUOVI DATI DALLE TORRI MEDIOEVALI DI BOLOGNA (ITALIA)*

RIASSUNTO

Uno dei maggiori problemi insiti nello studio sperimentale della degradazione meteorica è la scarsa ampiezza temporale delle misure, che ne limitano l'utilizzazione pratica. La maggiore rapidità del fenomeno di degradazione nei gessi rende in parte meno aleatori i dati disponibili per questo particolare litotipo ma non risolve completamente il problema.

Lo studio delle torri medioevali di Bologna ha permesso di studiare l'effetto della degradazione meteorica sul gesso su un intervallo di tempo di quasi un millennio. I risultati ottenuti, che sono in buon accordo quelli ottenuti in 4 anni di osservazioni con il sistema del MEM su affioramenti naturali vicini alla città di Bologna, hanno anche permesso di evidenziare per la prima volta come l'inquinamento atmosferico tenda a deprimere la degradazione meteorica del gesso per un valore di quasi l'8%.

Tra le altre varie forme di erosione dissoluzione osservate, di particolare interesse sono state le misure quantitative effettuate sui karren sviluppatasi quasi esclusivamente sui basamenti di gesso delle torri di Bologna. Queste hanno evidenziato l'esistenza di una relazione lineare tra la larghezza del karren e tempo di esposizione, mentre la profondità del karren risulta sempre essere correlata al tempo di esposizione ma in maniera esponenziale.

Il successo avuto nel caso dei gessi bolognesi, dovrebbe portare ad espandere l'idea di utilizzare le superfici di monumenti come laboratori sperimentali per la misura della degradazione meteorica anche per litotipi differenti, quali per esempio il calcare, per cui sarebbe particolarmente importante, vista la lentezza del fenomeno su questa roccia, poter disporre di dati relativi a 1000-2000 o anche più anni.

Parole chiave: Carsismo, Gessi, Degradazione Meteorica, Bologna

SUMMARY

GYPSUM METEORIC DEGRADATION: NEW RESULTS FROM MEDIEVAL TOWERS OF BOLOGNA

The short span of time normally available is one of the main problems affecting the experimental study of meteoric degradation and therefore hindering its practical use. The faster speed of the degradation phenomena in gypsum make the data more reliable, but don't completely resolve the problem.

(*) Lavoro effettuato con fondi CEE e MURST ex 40% e 60%.

(**) Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali dell'Università di Bologna.

(***) Istituto Italiano di Speleologia, Università di Bologna.

Studies on the medieval towers of Bologna provided data on gypsum degradation over an interval of time of almost a millennium. These results are in accordance to those previously obtained in 4 years of observation with the Micro Erosion Meter system on a natural outcrop near the city of Bologna. For the first time these studies have also evidenced how the atmospheric pollution tends to lower the weather degradation on gypsum for a value of almost 8%.

Beside these observations, the quantitative measures on karren was of particular interest among the other various erosional forms. These have evidenced a linear relation between the width of the karren on exposition time, while the depth of the karren always results correlated to the exposure time but in an exponential manner.

The achieved results should encourage the idea of utilising the historical monuments as experimental laboratories to measure the degradation not only for gypsum but also for different lithotypes, for example limestone, the scarce solubility of which requires very long exposure (some thousand years) to obtain reliable data on its meteoric degradation.

Keywords: Karst, Gypsum, Weathering, Bologna

Introduzione

Uno dei maggiori problemi insiti nello studio sperimentale della degradazione meteorica è a tutt'oggi rappresentato dalla scarsa ampiezza temporale delle misure, che raramente abbracciano un arco di tempo superiore ad una decina di anni o poco più.

Il limitato lasso temporale considerato, da un lato rende percentualmente più elevato l'effetto dell'errore sperimentale sul valore di degradazione globale misurato e dall'altro rende meno attendibili le estrapolazioni su lunghi periodi, e quindi di interesse geologico, basate sugli stessi.

Se questo è in assoluto vero per i calcari, gli studi iniziati recentemente sulla degradazione meteorica dei gessi del mediterraneo (CUCCHI *et al.*, 1998) hanno evidenziato come tali problemi sono, solo in parte, compensati dalla rapidità del processo di degradazione su questo particolare litotipo (in media 1.1 mm/1000 mm di pioggia).

Nell'area di Bologna, però, è stato possibile effettuare misure sperimentali sulla degradazione naturale dei gessi su un arco di tempo molto lungo e geologicamente significativo, grazie all'esistenza di monumenti, in particolare torri medioevali (Fig. 1), il cui basamento, e parte delle mura esterne, consiste di blocchi di gesso selenitico analogo a quello delle stazioni sperimentali della Croara.

Le precise notizie storiche disponibili (RICCI & ZUCCHINI, 1968) permettono poi di risalire con esattezza alla data di costruzione, o di rifacimento, di questi monumenti, e pertanto forniscono con precisione la data d'inizio dell'esposizione del gesso agli agenti atmosferici, esposizione che in alcuni casi è stata di quasi 1000 anni.

I dati così ottenuti sono stati confrontati ed integrati con quelli disponibili, per gli ultimi anni, dalle stazioni sperimentali posizionate sull'affioramento naturale della Croara, che dista pochissimi chilometri in linea d'aria dal centro di Bologna e che presenta quindi un regime di piogge assolutamente coerente con quello della città.

Nei paragrafi seguenti, dopo aver presentato i dati sperimentali questi stessi vengono discussi con particolare riguardo all'influenza che l'inquinamento atmosferico (in particolare quello di SO₂) ha sulla degradazione meteorica del gesso e quindi, sulla base delle misure effettuate, si forniscono prime ipotesi sui meccanismi evolutivi dei karren e delle candele embrionali in gesso.

Le misure sperimentali

La degradazione di questo materiale è in generale ascrivibile alla semplice dissoluzione ad opera delle precipitazioni meteoriche e quindi si riteneva che essa non fosse per nulla in-

fluenzata dalla presenza di agenti corrosivi estranei, quali per esempio il guano di piccione (ricco in acido nitrico e fosforico), o l'aumento dell'inquinamento atmosferico.

In realtà quest'ultimo, incrementando la concentrazione di SO_2 nell'atmosfera e di conseguenza quella dello ione $\text{SO}_4^{=}$ nell'acqua di precipitazione meteorica o di condensazione, dovrebbe causare, per l'effetto ione comune, una diminuzione della solubilità globale del gesso.

Gli studi sulla degradazione meteorica degli affioramenti gessosi italiani, comunque, hanno evidenziato che le acque di pioggia sciolgono solamente tra il 60 e l'85% del gesso teoricamente solubilizzabile (CUCCHI & FORTI, 1991; CUCCHI *et al.*, 1998). Si riteneva pertanto che la presenza di una certa concentrazione di SO_2 nell'atmosfera influenzasse il processo di solubilizzazione di questo minerale solo marginalmente. In prima battuta, quindi, si è ritenuto relativamente costante il rapporto quantità di pioggia/solubilizzazione del gesso per tutto il periodo di esposizione dei blocchi sulle torri bolognesi.

Sempre gli studi effettuati sugli affioramenti naturali di gesso avevano sperimentalmente evidenziato come l'abbassamento delle superfici gessose verticali fosse molto inferiore (~1:10) rispetto a quella delle superfici orizzontali e questo a causa del fatto che la solubilizzazione del gesso viene cinematicamente fortemente controllata dalla diffusione degli ioni dallo strato limite alla soluzione. La turbolenza dell'acqua a contatto con la superficie gessosa è quindi un fattore fondamentale per l'effettiva solubilizzazione: infatti l'impatto delle gocce di pioggia sulle superfici suborizzontali, causando una forte turbolenza e in parte distruggendo lo strato limite, accelerano la solubilizzazione, fenomeno che invece non può avvenire sulle pareti verticali ove, mancando l'impatto diretto, si ha semplicemente un flusso d'acqua praticamente laminare che poco o pochissimo interagisce con lo strato limite.

Per questo motivo nello studio sulla degradazione meteorica dei blocchi di gesso delle torri bolognesi si sono analizzati blocchi in esposizione sia orizzontale sia verticale.

In particolare sono state prese in considerazione 4 torri bolognesi: la Garisenda, la torre di via Altabella, la torre di Corte Galluzzi e l'Incoronata.

In quest'ultima i gessi del basamento sono protetti da un fregio di arenaria aggettante (v. Fig. 2) che ha impedito che la pioggia impattasse direttamente sul gesso, che veniva al massimo raggiunto da un flusso laminare di acqua: essi risultano quindi sostanzialmente intatti, a conferma che l'assenza di turbolenza rallenta moltissimo il fenomeno di dissoluzione di questo minerale. Solamente nei punti in cui dal sottosquadro del fregio di arenaria si staccavano gocce si sono sviluppati profondi fori di corrosione a forma conica molto allungata che verranno descritti più avanti.

La torre Garisenda è l'unica che si è potuta studiare nel suo complesso, sfruttando le impalcature che la rivestivano per il restauro. I valori osservati di abbassamento delle superfici gessose è risultato essere molto vario sia per la presenza di gesso messo in posto in epoche differenti (il basamento è stato rifatto tra il 1887 e il 1889) sia per la diversa "esposizione" dei blocchi di gesso esistenti sulle pareti verso la sommità della torre rispettivamente a 42 e 45 metri di altezza.

Per quel che concerne le misure verticali, si è potuto risalire al valore originario di aggetto dei blocchi di gesso sulle pareti, poiché quelli inseriti nella parete Est della torre sono risultati non degradati essendo stati protetti dal sottosquadro creatosi al momento dell'inclinazione della torre stessa (avvenuta mentre era ancora in costruzione) e quindi non sono stati mai interessati dalle precipitazioni meteoriche.

Infine, sulle altre torri bolognesi (quelle di via Altabella e di Corte Galluzzi) le osservazioni si sono limitate al basamento di gesso, non essendo stato possibile ispezionarne le pareti e le zone sommitali.

I valori misurati sono stati mediati, riassunti e messi in relazione ai dati disponibili sulla pioggia caduta in tab. 1, ove sono stati anche elencati i dati relativi agli affioramenti naturali della Croara.

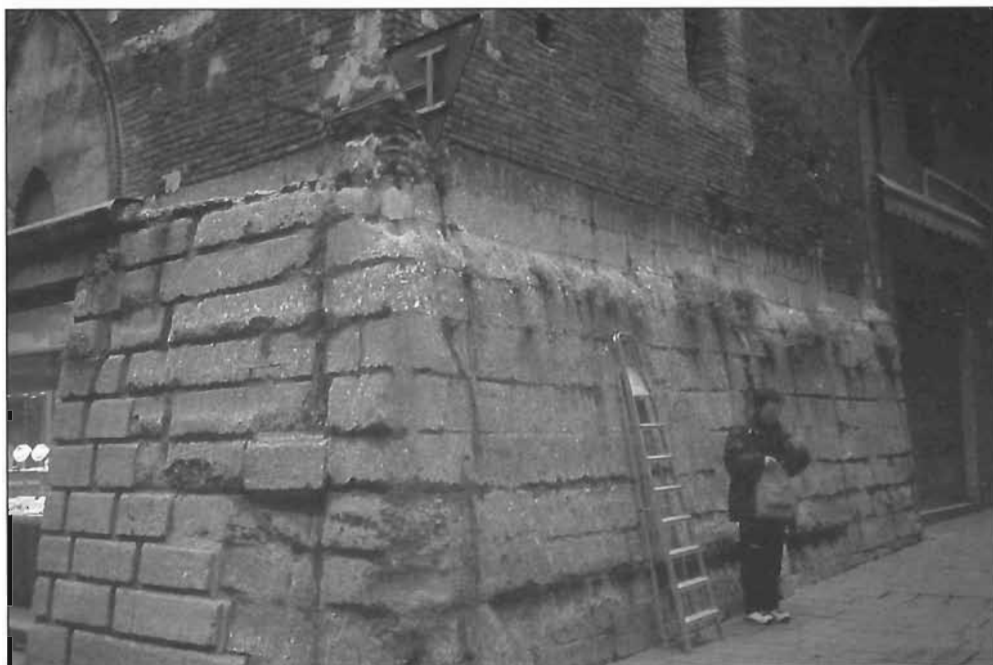


Fig. 1 - Basamento in gesso della torre medioevale di Via Altabella: il lato a destra, mai restaurato evidenzia un abbassamento notevole dei gessi, abbassamento che non può viceversa essere misurato sul lato a sinistra perché i blocchi di gesso originari sono stati sostituiti durante un recente restauro.

Fig. 2 - Particolare del basamento della torre Incoronata di Bologna con il cordolo di arenaria aggettante che protegge il sottostante basamento di gesso.

Torre	Posizione del blocco	Periodo di esposizione (anni)	Tipo di esposizione	Abbassamento medio (mm)	Abbassamento medio annuo (mm)	Pioggia totale (mm)	Abbassamento medio/1000 mm di pioggia
Croara	Affioramento naturale	4	Orizzontale	3.2±0.5	0.80±0.1	2917	1.10
Croara	Affioramento naturale	2	Verticale	0.14±0.07	0.07±0.05	1512	0.09
Garisenda	Sommità del basamento	110	Orizzontale	86±10	0.78±0.1	72484	1.18
Garisenda	45 m: centro lato N	888	Verticale	148±10	0.17±0.01	595848**	0.25
Garisenda	42m: centro lato N	888	Verticale	140±10	0.16±0.01	595848**	0.24
Garisenda	45 m: centro lato S	888	Verticale	90±10	0.10±0.01	595848**	0.14
Garisenda	42m: centro lato S	888	Verticale	80±15	0.09±0.02	595848**	0.13
Garisenda	45 m: centro lato O	888	86%	370±50	0.42±0.06	595848**	0.63
Garisenda	42m: centro lato O	888	86%	250±25	0.28±0.03	595848**	0.42
Garisenda	45 m: centro lato E	888	94%	0±10	0.0±0.01	595848**	0.0
Garisenda	42m: centro lato E	888	94%	0±10	0.0±0.01	595848**	0.0
Galluzzi	Sommità del basamento	742	Orizzontale	653±25	0.88 0.03	497882**	1.31
Altabella	Sommità del basamento	848*	Orizzontale	693±15	0.82±0.04	569008**	1.22

Tab. 1 Valori di degradazione meteorica osservati su blocchi di selenite di 3 torri medioevali di Bologna e misurati in affioramento naturale alla Croara.

* Dato con indeterminazione di circa 30 anni.

** Dato estrapolato dai dati di piovosità disponibili per Bologna (1833-1998).

Degradazione meteorica di superfici suborizzontali

Dalla tabella 1 si ricava che i dati di degradazione meteorica misurati sulle superfici suborizzontali dei blocchi di gesso delle torri bolognesi sono in buon accordo con i valori di degradazione meteorica misurati per 4 anni consecutivi sugli affioramenti naturali della Croara con i metodo del Micro Erosion Meter (CUCCHI *et al.*, 1998, FORTI dati non pubblicati), infatti l'indice di correlazione R^2 (Fig. 3) è risultato essere 0,9968 e il valore medio di degradazione è risultato essere 0.84 mm/anno.

Per il basamento della Garisenda è stato possibile anche calcolare il valore medio di abbassamento relativo a 1000 mm di pioggia (1.18) che è risultato essere leggermente più alto di quello relativo agli affioramenti naturali della Croara (1.10). Utilizzando poi tutti i dati di precipitazioni annui disponibili per la città di Bologna (1833-1998) si è ottenuto un valore medio annuale che è stato utilizzato per ottenere un valore estrapolato per la degradazione dei gessi rispetto alle piogge negli ultimi 900 anni.: tale dato è risultato essere 1,26 mm per 1000 mm di pioggia caduta, con indice di correlazione $R^2 = 0,99$ (Fig. 4).

È interessante qui notare come tali valori (Tab.2), pur essendo tutti tra loro ben compatibili se si considerano gli errori sperimentali e le approssimazioni utilizzate per il calcolo delle piogge totali, tendono a decrescere dai valori relativi a intervalli più lunghi a quello misurato attualmente nell'affioramento naturale della Croara. Questo fatto porterebbe ad indicare che l'effetto dell'acidificazione delle piogge non è influente nel meccanismo di solubilizzazione del gesso, come ritenuto sino ad ora, ma avrebbe contribuito ad abbassarne in un certo qual modo la solubilità.

Per verificare questa ipotesi si è partiti dall'osservazione che i materiali litici (in special modo le arenarie) di Bologna, si sono conservate perfettamente sino alla fine della seconda guerra mondiale, mentre il loro degrado è stato rapidissimo negli ultimi 50 anni. Dato che la degradazione di questi materiali dipende dalla concentrazione della SO_2 si è ritenuto logico prendere lo stesso periodo come intervallo temporale in cui tale composto poteva aver influenzato, tramite il meccanismo delle ione comune, la solubilizzazione del gesso.

Si è considerato quindi il valore sperimentale ricavato dalle misure effettuate con il M.E.M. sugli affioramenti naturali della Croara (1.10, relativo agli anni 1994-1998) come rappresentativo di questi ultimi 50 anni. Si è ricalcolato, quindi, in base a questo, i valori di degradazione per 1000 mm di pioggia caratteristici per la Garisenda, via Altabella e Corte Galluzzi per il periodo antecedente al 1950, ottenendo valori molto più simili tra loro (Tab. 2).

Torre	Periodo di esposizione	Pioggia (mm)	Abbassamento medio (mm)	Abbassamento medio/1000 mm di pioggia
Garisenda	1950-1998	32160	35.38	1.10
	1888-1950	40324	50.62	1.26
	1888-1998	72484	86±10	1.18
	1950-1998	32160	35.38	1.10
Galluzzi	1256-1950	465722	617.62	1.33
	1256-1998	497882	653±25	1.31
	1950-1998	32160	35.38	1.10
Altabella	1140-1950	536848	657.62	1.23
	1140-1998	569008	693±15	1.22

Tab. 2 - Valori della degradazione meteorica dei gessi delle torri Bolognesi: oltre al valore cumulativo totale, vengono forniti i dati relativi al periodo di esposizione dal 1950 ad oggi, e quelli relativi al periodo antecedente al 1950, calcolati prendendo come valore di degradazione media per il periodo 1950 ad oggi quello desunto dalle misure sperimentali in Croara effettuate tra il 1994 e il 1998.

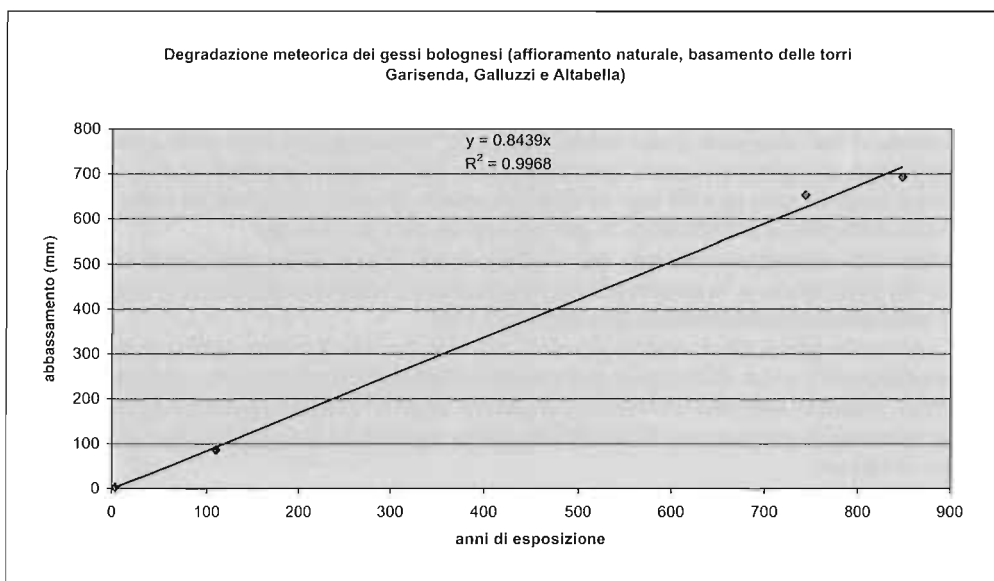


Fig. 3 - Abbassamento delle superfici suborizzontali dei gessi esposti alla sommità dei basamenti delle torri di Bologna: vi è una correlazione lineare molto buona tra i valori medi misurati e il tempo di esposizione agli agenti meteorici con un valore medio di abbassamento annuo per questo millennio di 0.84 mm.

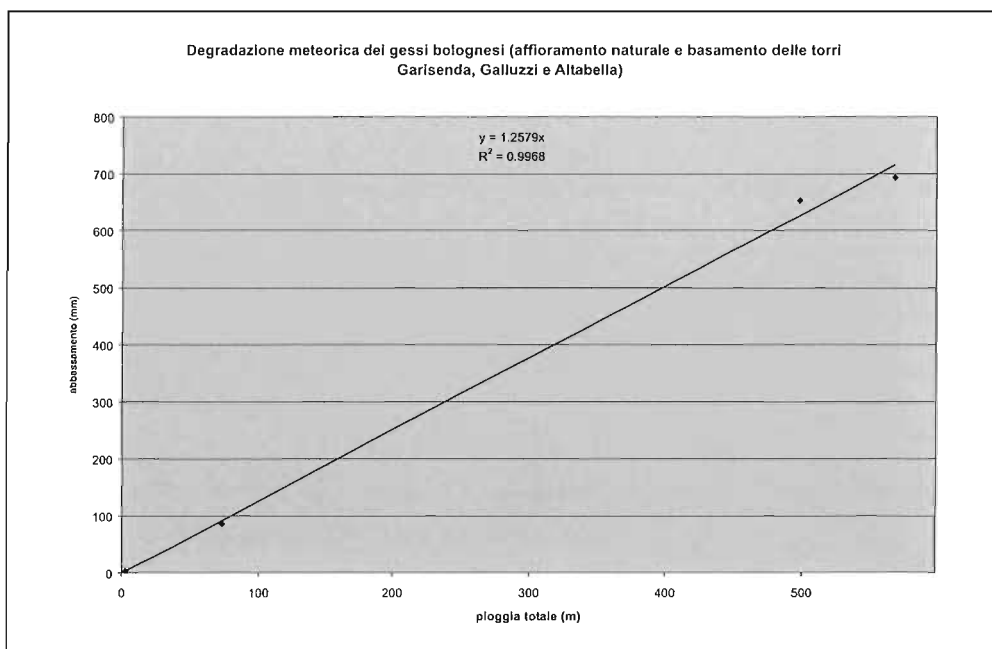


Fig. 4 - Abbassamento delle superfici suborizzontali dei gessi esposti alla sommità dei basamenti delle torri di Bologna: vi è una correlazione molto buona tra i valori medi misurati e la quantità di pioggia caduta, con un valore medio di abbassamento per 1000 mm di pioggia di 1.26 mm.

Inoltre il valore di degradazione che si ottiene, sulla base delle precipitazioni effettive, per la Garisenda per il periodo antecedente al 1950 (1.26) corrisponde esattamente al valore ottenuto, tramite la retta di regressione, per tutte le torri e per l'intero periodo di esposizione (Fig. 4).

Pertanto si può assumere come valore "naturale" della degradazione meteorica per 1000 mm di pioggia dei gessi bolognesi quello ottenuto per la torre Garisenda (1.26), valore che peraltro si discosta solo di 0.01 mm in meno da quello ottenuto dalla retta di regressione per il periodo antecedente il 1950 (Fig. 5) per tutte le tre torri considerate.

Questi dati evidenziano dunque che l'effetto delle piogge acide sulla degradazione meteorica dei gessi esiste e, in questo ultimo mezzo secolo, avrebbe contribuito a ridurre la naturale velocità di degradazione dei gessi di circa l'8%.

L'insieme di questi nuovi dati ha permesso di stabilire che il valore medio di degradazione meteorica per i gessi di Bologna si è conservato praticamente inalterato per tutto questo millennio, variando solo nell'ultimo mezzo secolo, quando l'inquinamento ha fatto aumentare notevolmente il contenuto in SO_2 nell'atmosfera e quindi variato gli equilibri di solubilizzazione del gesso.

L'importanza di questi dati risiede anche nel fatto che, evidenziando la sostanziale stabilità nella velocità di degradazione meteorica dei gessi, permettono di utilizzarne eventualmente le misure di abbassamento al fine di datare manufatti di cui non si conosca l'anno di costruzione.

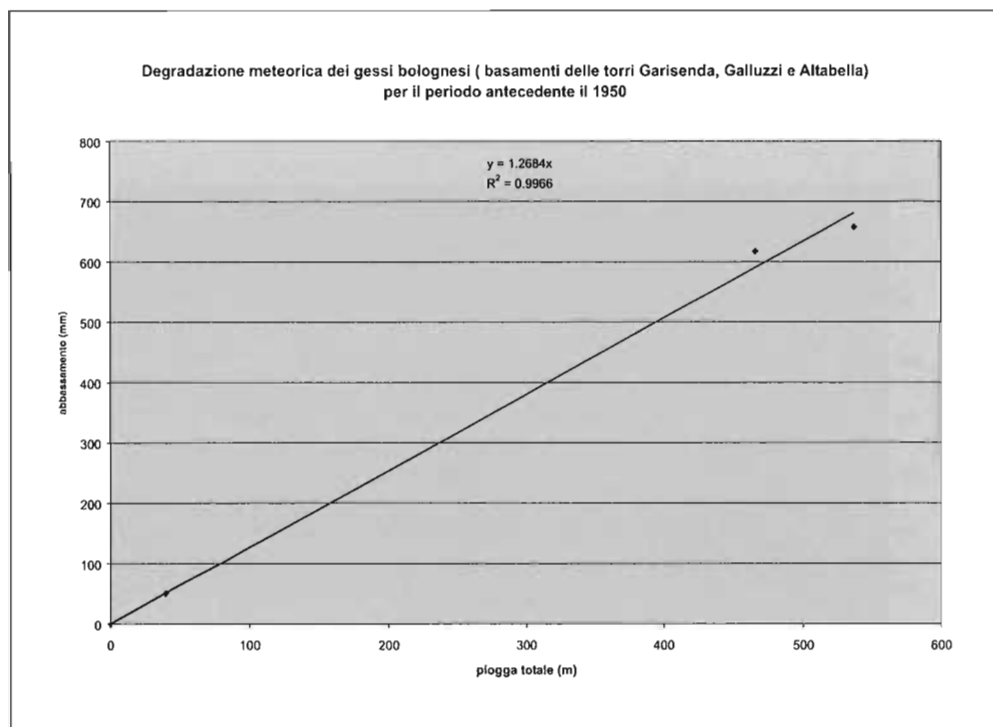


Fig. 5 - Abbassamento delle superfici suborizzontali dei gessi esposti alla sommità dei basamenti delle torri di Bologna prima del 1950: vi è una correlazione molto buona tra i valori medi misurati e la quantità di pioggia caduta, con un valore medio di abbassamento per 1000 mm di pioggia di 1.27 mm.

Degradazione meteorica di superfici subverticali

Misure di degradazione su superfici verticali sono state possibili solamente sulla Torre Garisenda. I dati così ottenuti hanno confermato la molto minore degradazione delle superfici verticali rispetto a quelle orizzontali, pur dando una maggiore variabilità da 0.16 a 0.9 mm/a. Essi sono comunque risultati leggermente più alti dei valori sperimentali ottenuti con il metodo M.E.M. per superfici naturali di gesso in Croara, il cui valore medio, su due anni di misure, è risultato 0.07 ± 0.05 (CUCCHI *et al.*, 1998).

Sia la maggiore variabilità dei dati sia il loro valore più elevato rispetto a quello relativo all'affioramento naturale dipendono dal fatto che in realtà i blocchi di gesso sulle pareti verticali della Garisenda sono esposti in maniera differente alle precipitazioni meteoriche.

La differenza maggiore si nota tra i valori osservati nel lato Nord rispetto a quelli del lato Sud: i valori misurati indicano infatti che la degradazione sul lato Nord è quasi il doppio di quella sul lato Sud.

Questa differenza è da imputarsi al fatto che la parete Sud è “protetta” della vicinissima torre Asinelli (98 metri di altezza a circa 10 metri di distanza), mentre la parete Nord è libera e, quindi, i venti possono convogliarvi una maggiore quantità di pioggia e, nel contempo, fornire un angolo di impatto tale da permettere una accelerazione della cinetica di solubilizzazione del gesso.

Sebbene poi i dati siano troppo pochi per potere fornire indicazioni definitive, sembrerebbe presente anche un “fattore altezza”: infatti i valori di degradazione per i blocchi a 45 metri da terra, a parità di esposizione, sono sempre maggiori di circa un 10% di quelli osservati a 42 metri: sembrerebbe quindi che, con l'aumento dell'altezza, aumentasse progressivamente la probabilità che i venti portino le piogge a impattare direttamente le superfici gessose.

Sulla base di tutte queste considerazioni il dato relativo alla situazione più simile a quello dell'affioramento naturale della Croara è certamente quello di 42 metri lato Sud che, essendo superiore solamente di poco più del 20%, per una differenza di elevazione di oltre 40 metri in pratica conferma la validità di quel dato ricavato sull'affioramento naturale, anche se relativo ad un intervallo molto breve (solo 2 anni).

Degradazione meteorica di superfici inclinate

I dati raccolti sulle pareti inclinate (quella Est aggettante e quella Ovest quasi verticale) hanno evidenziato come il discostamento dalla verticalità di pochi gradi comporti forti effetti sulla degradazione del gesso. I blocchi incapsulati sulla parete aggettante di poco meno di 4°, come detto precedentemente, sono infatti risultati assolutamente non degradati tanto da permettere di stabilire l'originale oggetto di tutti i blocchi rispetto alle strutture murarie della torre.

Al contrario quelli della parete Ovest si sono degradati molto di più rispetto a quelli delle pareti Nord e Sud (Tab. 1) con valori annui che sono risultati essere da 3 a 4 volte superiori. È interessante notare che un discostamento dalla verticalità di appena 4° porta a valori di degradazione annua compresi tra il 35 e il 53% di quella caratteristica delle superfici orizzontali. Questo dimostra come sia sufficiente anche un leggerissimo discostamento dalla verticalità per influenzare pesantemente la cinetica di dissoluzione dei gessi, probabilmente per il fatto che la struttura a grossi cristalli, una volta non più perfettamente lisciata, rende molto facile il passaggio da moto laminare a moto turbolento quando le condizioni di flusso idrico lo permettono.

Fenomeni di degradazione da gocciolamento, ruscellamento e condensazione

I blocchi di gesso delle torri di Bologna hanno evidenziato, oltre al fenomeno principale dell'abbassamento per dissoluzione da precipitazioni meteoriche, anche altri tipi di degradazione particolari dovuti alle condizioni di flusso idrico che si venivano ad instaurare in ben determinate zone (gocciolamenti e/o ruscellamenti) o all'instaurarsi localizzato di processi di condensazione.

Nella Torre dell'Incoronata, come abbiamo accennato precedentemente, un cordolo di arenaria ha protetto il gesso del basamento dall'esposizione diretta alle precipitazioni meteoriche: i blocchi quindi risultano praticamente inalterati se si eccettuano alcuni profondi fori verticali, parzialmente aperti verso l'esterno (Fig. 6) in coincidenza dei punti da cui, per un periodo di tempo probabilmente breve, iniziato quando il cordolo medesimo è stato protetto con un rivestimento impermeabile, si è avuto gocciolamento dal sottosquadro del cordolo di arenaria. L'acqua di gocciolamento, provenendo dal dilavamento dei mattoni e dell'arenaria sovrastante era del tutto priva di gesso solubilizzato e pertanto nel punto di impatto rapidamente creava un cono di corrosione che tendeva a propagarsi sempre più in profondo con un meccanismo analogo a quello che porta alla formazioni di conuliti nei depositi di gesso in grotta (HILL & FORTI, 1997).

Sulle superfici sommitali subverticali dei basamenti delle torri Garisenda, Altabella e Galluzzi troviamo ben sviluppati karren (Fig. 7) che si evolvono per il flusso turbolento canalizzato di filetti d'acqua di pioggia che non hanno ancora del tutto esaurito il loro potere solvente nella superficie sommitale.

I karren più grandi si trovano sulla torre di via Altabella ove raggiungono la larghezza di 10 cm e oltre e la profondità di 9 cm. Più piccoli quelli della Torre di Corte Galluzzi che presentano larghezze massime di 7.5 e profondità di 4 cm e quelli della Garisenda con larghezze massime di 2.5 centimetri e profondità di 2. I dati mediati per tali karren sono raccolti in Tab. 3.

Torre	Periodo di esposizione (anni)	Larghezza media (cm)	Profondità media (cm)
Garisenda	110	1.4	0.4
Galluzzi	742	6.5	4.0
Altabella	848	7.3	7.0

Tab. 3 - Dimensioni medie dei karren osservati sui basamenti delle torri Garisenda, Galluzzi e Altabella.

Pur nella oggettiva scarsezza di dati, sembra esistere un relazione diretta tra periodo di esposizione, larghezza e profondità dei karren sviluppati nei gessi dei basamenti delle tre torri considerate. La larghezza dei karren è risultata esser linearmente dipendente dal tempo di esposizione (Fig. 8) con coefficiente di correlazione molto alto ($R^2 = 0.9949$) e valore annuo di allargamento di 0.087 mm/a. La profondità degli stessi (Fig. 9) è risultata viceversa esponenzialmente correlata agli anni di esposizione con indice di correlazione $R^2 = 0.9627$.

È la prima volta in assoluto che si ricavano relazioni di questo tipo per forme di dissoluzione-corrosione del tipo karren: il motivo evidentemente risiede nel fatto che i karren in generale, e non soltanto in gesso, non erano mai stati studiati quantitativamente per un lasso di tempo così lungo da poter permettere questo tipo di osservazioni. Negli affioramenti naturali, infatti, difficilmente i tempi di esposizione sono differenti da punto a punto in maniera significativa e inoltre risulta praticamente impossibile una loro discriminazione sufficientemente esatta.



Fig. 6 - I fori da gocciolamento nel gesso protetto dal sottosquadro di arenaria della torre Incoronata.



Fig. 7 - Misura della larghezza e della profondità dei karen sviluppatisi nei gessi sopra il cordolo di gesso del basamento della torre Garisenda negli ultimi 110 anni.

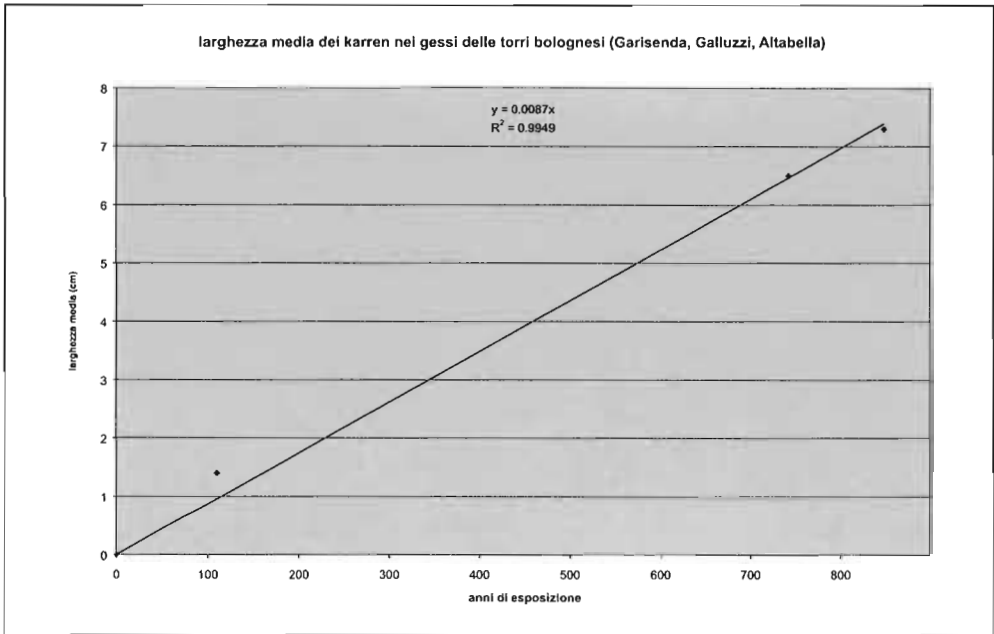


Fig. 8 - Larghezza media dei karren osservati sulle torri analizzate: vi è una correlazione lineare molto buona tra i valori medi misurati e il tempo di esposizione agli agenti meteorici con un valore medio di allargamento annuo per questo millennio di 0.09 mm.

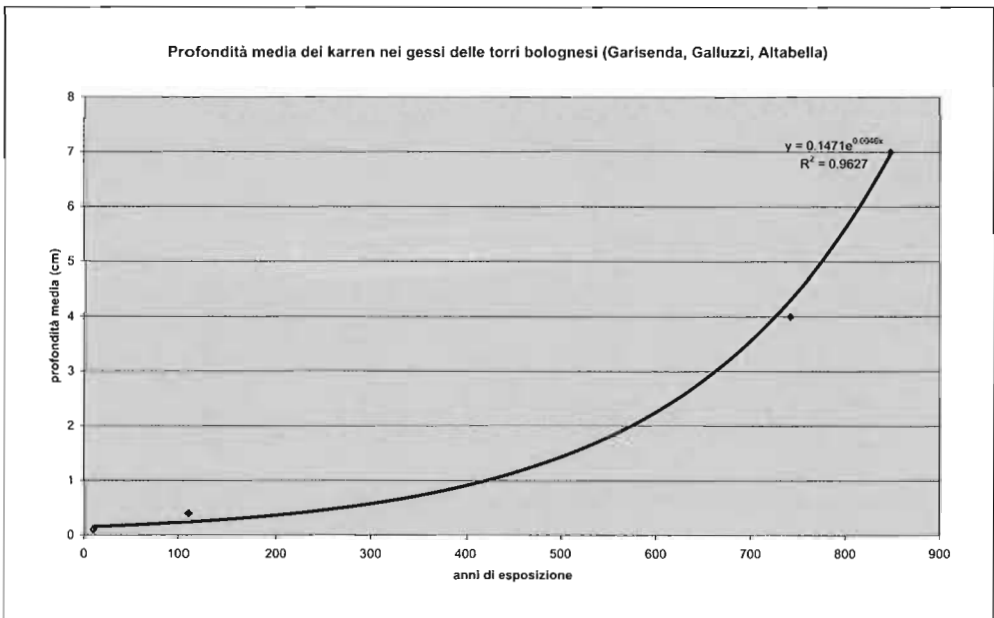


Fig. 9 - Profondità media dei karren osservati sulle torri analizzate: vi è una correlazione esponenziale molto buona tra i valori medi misurati e il tempo di esposizione agli agenti meteorici.

Allo stato attuale delle conoscenze, comunque, basandosi solo sui dati delle torri di Bologna, è difficile fornire un modello genetico che spieghi compiutamente l'evoluzione osservata. Si può ragionevolmente avanzare l'ipotesi che la larghezza dei karren in gesso dipenda esclusivamente dalla quantità d'acqua che cumulativamente vi è passata: le sue pareti laterali, infatti, durante le precipitazioni, sono interessate da un flusso di acqua che tende a convergere verso il centro del karren medesimo. Queste acque sciogliendo in parte le pareti laterali del karren, ne provocano un arretramento, che si risolve in un allargamento del karren medesimo. Sulla base di questa ipotesi, quindi, il processo sarebbe linearmente correlato alla quantità di pioggia caduta e, quindi, come effettivamente indicano i dati sperimentali, al tempo. L'approfondimento centrale del karren, invece, risentirebbe non solo e non tanto della quantità d'acqua totale piovuta, ma soprattutto di una serie di altri parametri quali innanzitutto la quantità d'acqua che effettivamente scorre all'interno del karren stesso. Infatti l'allargamento del karren, nel suo progredire, convoglia sempre più acqua a fluire sul fondo dello stesso con conseguente aumento nel tempo della velocità di approfondimento, che risulterebbe quindi essere un fenomeno non linearmente correlato al tempo o alla quantità di pioggia caduta.

È evidente che le schematizzazioni appena proposte sono semplificazioni molto spinte della realtà, non tenendo in conto molti fattori che viceversa sicuramente condizionano la variazione temporale dell'ampiezza e della profondità dei karren in gesso: tra questi possiamo certamente citare la tessitura cristallina della roccia gessosa, il cui effetto sulle microforme carsiche che effettivamente si sviluppano è stato recentemente messo in luce (FORTI, 1996), ma anche gli effetti della presenza di altri karren che vengono via via ad interferire tra di loro nel progressivo allargamento.

Per completare il panorama delle forme minori di degradazione dei gessi delle torri bolognesi, bisogna ancora accennare a due fenomeni osservati solamente sulla torre Garisenda: le docce subverticali e le cavità da condensazione. Docce subverticali con diametro di 5-7 cm e profonde sino a 10 cm (Fig. 10) sono presenti in alcuni dei massi di gesso verso la sommità



Fig. 10 - Torre Garisenda: docce subverticali dovute al ruscellamento di acqua piovana incanalata lungo le fratture dei mattoni al di sopra del blocco di gesso.



Fig. 11 - Torre Garisenda: cristalli di gesso erosi, residui della dissoluzione del gesso da parte delle acque di condensazione.

nei gessi della torre Garisenda è relativa sempre ai massi incapsulati sulle pareti Nord, Sud e Ovest ed è indotta dal fenomeno della condensazione.

L'acqua di precipitazione meteorica infatti viene adsorbita dai mattoni che ne immagazzinano una certa quantità nelle porosità al loro interno. Al termine dell'evento piovoso tale acqua riaffiora richiamata per capillarità: le pareti di gesso che sono quindi a contatto con i mattoni vengono in parte solubilizzate distaccandosi così di qualche millimetro dagli stessi. A questo punto si instaura il meccanismo della evaporazione-condensazione che porta alla evoluzione di cavità che tendono ad allargarsi verso l'alto a causa dei moti convettivi del vapore acqueo. Tale meccanismo è attivo essenzialmente lungo le due pareti verticali del blocco di gesso dato che è in quelle zone dei sottosquadri che la capillarità, evaporazione e successiva condensazione è più efficiente.

Absolutamente distintiva per questo tipo di degradazione è la presenza di sottili cristalli di gesso corrosivi, che si protendono dalla massa rocciosa all'interno della cavità (Fig. 11): tali cristalli altro non sono che la parte ancora non disciolta dalle acque di condensazione della tessitura cristallina che originariamente dava luogo alla roccia. Proprio l'esistenza di questi sottili e delicatissimi cristalli dimostra che la degradazione in questo caso è avvenuta ad opera di acque prive di ogni minima energia cinetica.

Conclusioni

L'analisi degli effetti della degradazione meteorica sui blocchi di gesso delle torri medioevali di Bologna ha fornito, per la prima volta, dati sperimentali di abbassamento delle su-

della Garisenda, soprattutto nella parete O e, con molto minor frequenza e sviluppo, nelle porzioni di pareti N e S in contatto con la parete Ovest. Tali forme si sono sviluppate solo dopo che la degradazione meteorica aveva portato il blocco di gesso ad essere incassato rispetto alla struttura di mattoni delle pareti. In queste condizioni l'acqua di precipitazione meteorica, che fluisce sui muri della torre, si incanala lungo ben precise direzioni dovute spesso alla presenza di fratturazioni dei mattoni stessi: l'arrivo di tali flussi d'acqua "canalizzati" a livello del sottosquadro con il gesso da luogo a piccole "cascatelle" d'acqua che in breve tempo hanno permesso alle docce subverticali di evolvere. L'evoluzione di tali docce prosegue sotto forma di semitubo subcircolare fintantochè la dimensione delle stesse non è tale da permettere la caduta dell'acqua dal sottosquadro senza che questa bagni il gesso: da questo momento in avanti la degradazione del gesso avviene esclusivamente ad opera dello splash e quindi la doccia trasforma gradatamente la sua sezione in troncoconica.

L'altra forma di degradazione evidenziata

perfici esposte alle precipitazioni meteoriche per un lasso di tempo abbastanza lungo e quindi geologicamente significativo (oltre 800 anni).

I risultati così ottenuti sono in buon accordo con quelli ricavati, in 4 anni di osservazioni con il sistema del M.E.M., su affioramenti naturali vicini alla città di Bologna (CUCCHI *et al.*, 1998), e hanno anche permesso di evidenziare, per la prima volta, come l'inquinamento atmosferico (SO₂) abbia influenzato, a partire dai primi anni '50, la degradazione meteorica dei gessi dell'area di Bologna, deprimendola per circa l'8% a causa dell'effetto dello ione comune.

Tra le altre varie forme di erosione-dissoluzione osservate, di particolare interesse sono state le misure quantitative effettuate sui karren sviluppatisi sui basamenti di gesso delle torri.

Queste hanno, per la prima volta, suggerito l'esistenza di una relazione lineare tra la larghezza del karren e tempo di esposizione, mentre la profondità del karren risulterebbe essere correlata al tempo di esposizione ma in maniera esponenziale.

In conclusione si può affermare che l'utilizzo dei monumenti bolognesi quali laboratori sperimentali per lo studio della degradazione meteorica del gesso e delle morfologie correlate è stato molto utile ed ha permesso da un lato di confermare con nuovi, e per certi versi più attendibili, dati i valori sperimentali ricavati da misure dirette sul terreno e dall'altro di evidenziare fenomeni mai sino ad oggi osservati e misurati quali l'influenza dell'inquinamento atmosferico sulla degradazione del gesso ed i meccanismi di allargamento-approfondimento dei karren in gesso.

Il successo avuto nel caso dei gessi bolognesi, dovrebbe portare ad espandere l'idea di utilizzare le superfici di monumenti come laboratori sperimentali per la misura della degradazione meteorica anche e soprattutto per litotipi differenti, quali per esempio il calcare, per cui sarebbe particolarmente importante, vista la lentezza del fenomeno su questa roccia, poter disporre di dati relativi a 1000-2000 o anche più anni.

BIBLIOGRAFIA

- CUCCHI F., FORTI P., 1993 - *Problemi di carsificazione nei gessi: le microforme superficiali e sotto copertura*. Atti Congresso Naz. Speleol., Udine 1990 vol.1, p. 89-100.
- CUCCHI F., FORTI P., FINOCCHIARO F., 1998 - *Gypsum degradation in Italy with respect to climatic, textural and erosional conditions*. Geogr. Fis e Dinam. Quat. Suppl. III, t.4, p. 41-49.
- FORTI P., 1991 - *Il carsismo nei gessi con particolare riguardo a quelli dell'Emilia-Romagna*. Speleologia Emiliana s.4, n.2, p. 11-36.
- FORTI P., 1996 - *Erosion rate, crystal size and exokarst microforms*. Proc. Int. Symp. on Karren Landforms, Soller (Mallorca) 19-22 Settembre 1995, p. 261-276.
- HILL C.A., FORTI P., 1997 - *Cave minerals of the world*. N.S.S., Muntsville, pp. 426.
- RICCI C., ZUCCHINI G., 1968 - *Guida di Bologna*. Edizioni Alfa, Bologna, p. 80-81.