La Clinica del Calcestruzzo

Prof. Dr. Vito ALUNNO ROSSETTI
Dott. Ing. Antonella FERRARO

Fenomeni di imbarcamento e caduta di lastre di Marmo di Carrara da facciate ventilate

2007

PROF. VITO ALUNNO ROSSETTI

ING. ANTONELLA FERRARO

FENOMENI DI IMBARCAMENTO E CADUTA DI LASTRE DI MARMO DI CARRARA DI FACCIATE VENTILATE

INDICE

1. SOMMARIO 1

2. DEFORMAZIONI DEL MARMO, ORIGINE E FATTORI 1

2.1 NATURA DEL FENOMENO; EFFETTI DELL'ANISOTROPIA 1
2.2 INFLUENZA DELL'ANISOTROPIA CRISTALLINA E DELL'UMIDITÀ 4
2.3 FORMAZIONE DI GESSO ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 5
2.4 FORMAZIONE DI CALCITE 5
2.5 EFFETTI DEI CICLI GELO-DISGELO 5

3. L'IMBARCAMENTO DELLE LASTRE DI MARMO SOTTILI 6

3.1 DEFORMAZIONI E FENOMENI DI ISTERESI 7
3.2 EFFETTO DEGLI ANCORAGGI 8
3.3 DEFORMAZIONE E COAZIONI 8

4. INDEBOLIMENTO DEL MARMO 9

5. UN CASO DI STUDIO: FENOMENO VERIFICATOSI NEL XXI SECOLO SU UN GRUPPO DI EDIFICI PUBBLICI IN ITALIA CENTRALE 10

5.1 ENTITÀ DEI FENOMENI RISCONTRATI 10
5.2 ATTIVITÀ SUCCESSIVE ALL'OSSERVAZIONE DEI FENOMENI 11
5.3 PREVEDIBILE EVOLUZIONE DEI FENOMENI 11

6. CONCLUSIONI 12

7. BIBLIOGRAFIA 13

Prof. Dr. Vito ALUNNO ROSSETTI

Tecnologia dei materiali e
Chimica applicata - Facoltà di Ingegneria
Università di Roma "La Sapienza"

Ing. A. Ferraro

Clinica del calcestruzzo

Nota tecnica

FENOMENI DI IMBARCAMENTO E CADUTA DI LASTRE DI MARMO DI CARRARA DI FACCIATE VENTILATE

1. Sommario

I fenomeni di cui si parla sono stati riconosciuti empiricamente sin dalla fine del XIX secolo, sono stati studiati ed interpretati scientificamente nella seconda metà del '900 e hanno infine generato veri e propri disastri verso la fine del secolo scorso, tra i quali ben conosciuti per la loro importanza e risonanza quelli dell'Amoco Building di Chicago, la Grande Arche a Parigi, la Finlandia Hall di Helsinki e la IBM Tour di Brussels. Sembra pertanto strano che ancora si ritenga di fare uso di questi materiali e di questa tecnica, che alla luce delle conoscenze disponibili dovrebbero essere limitati ad impieghi in interno, essendo l'ambiente esterno, capace di generare sollecitazioni eccessive, imbarcamento, invecchiamento, fessurazione e danneggiamento delle lastre.

Ai punti seguenti:

- verranno riprese indicazioni della letteratura tecnica sull'argomento in merito ai principali aspetti chimico-fisici e micro strutturali che originano i difetti rilevati,
- si passeranno in rassegna i fenomeni riscontrati,
- si esporranno considerazioni sul prevedibile sviluppo dei fenomeni e delle misure da prendere.

La trattazione ha carattere divulgativo ed è indirizzata essenzialmente a Progettisti che prendano in considerazione l'impiego di questa recnica.

2. Deformazioni del marmo, origine e fattori

Ai punti seguenti verranno discussi sinteticamente i meccanismi che portano allo sviluppo dell'imbarcamento e i suoi aspetti principali.

2.1 Natura del fenomeno; effetti dell'anisotropia

L'origine dei fenomeni osservati è certamente complessa e non ancora perfettamente spiegata rispetto a tutti i suoi fattori. In questo paragrafo si cercherà di dare una spiegazione intuitiva, utilizzando dati della letteratura ed informazioni sulla natura dei materiali solidi cristallini.

Come è noto, il marmo è una roccia costituita essenzialmente dal minerale calcite, (con l'aragonite e la vaterite una delle varietà polimorfiche del carbonato di calcio, $CaCO_3$). Nelle seguenti Figura 1 e Figura 2 è rappresentata la cella elementare del reticolo cristallino di questo minerale*, evidenziando o meno gli atomi di ossigeno e carbonio. La forma della cella è quella di un prisma retto avente base rombica, con un angolo di 120 gradi (tre celle affiancate formano un prisma esagonale).

A causa di asimmetrie dei legami C-O, nella calcite risultano evidenti diverse manifestazioni di anisotropia, tra le quali le più conosciute sono quella ottica (fenomeno della birifrangenza) e quella della dilatazione termica. Per quest'ultima si osserva a 20°C un coefficiente di dilatazione termica lineare pari a circa $23 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} lungo l'asse c della cella elementare, e un coefficiente di dilatazione negativo, cioè una contrazione, pari a circa - $4 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} nelle direzioni trasversali a e b.

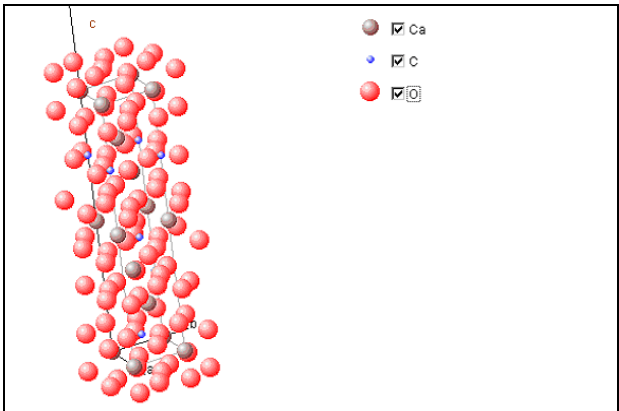

Figura 1 - Cella elementare della Calcite ($CaCO_3$). Lati a e b 5 Å, c 17 Å

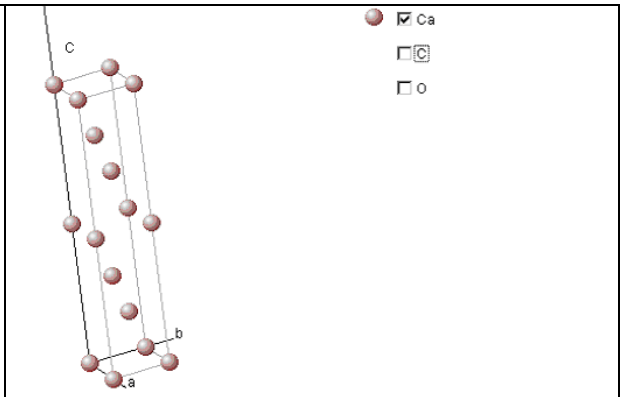

Figura 2 - Cella elementare della Calcite con i soli atomi di carbonio

Su un ***monocristallo*** di calcite (cioè un elemento solido nel quale esiste un unico reticolo cristallino, costituito dalla ripetizione ordinata nello spazio della cella elementare), come quello mostrato nella Figura 3†, alternanze di riscaldamento e raffreddamento portano alla dilatazione (e contrazione) "all'unisono" nella direzione dell'asse C ed alla contrazione (e dilatazione) trasversale del cristallo, poiché tutte le celle sono isoorientate (Figura 4). Per questo motivo i cicli di temperatura non hanno particolari conseguenze a livello macroscopico sui monocristalli.

* La calcite appartiene al sistema trigonale, classe esagonale scalenoedrica, con parametri reticolari a = 4.9896, alfa = 90.00; b = 4.9896, beta = 90.00; c = 17.0610 , gamma = 120.00

† In un piccolo cristallo di calcite come quello della figura, delle dimensioni di circa un centimetro cubo, sono presenti approssimativamente $3\ 10^{21}$ celle elementari.

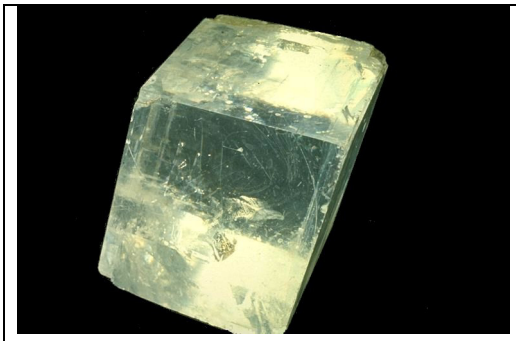

Figura 3 – Monocristallo di calcite

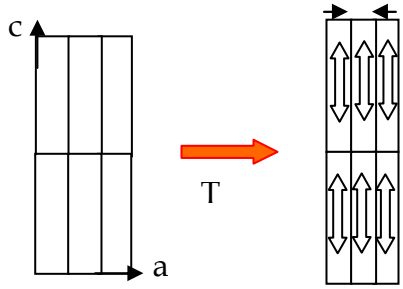

Figura 4 – La dilatazione termica dell'asse c e la contrazione dell'asse a avvengono "all'unisono" per tutte le celle del monocristallo

Nel caso di un solido policristallino quale il marmo, costituito cioè da un insieme di piccoli monocristalli (grani) di calcite, orientati casualmente in fase di nucleazione ed accrescimento, aventi dimensioni di frazioni di millimetro (mediamente 0,2 mm, si veda la Figura 5) il comportamento è molto diverso, poiché, proprio per la diversità dell'orientazione di un grano rispetto all'altro, a seguito delle variazioni di temperatura possono svilupparsi sollecitazioni meccaniche locali, la cui intensità è tale da riuscire a "scollare" i diversi grani creando delle microfratture; questo fenomeno viene indicato in letteratura con il termine "decoesione cristallina".

Nella Figura 5, ad esempio, le direzioni dell'asse c di ciascun grano cristallino sono perpendicolari ai piani di scorrimento a/b, individuati dalle striature parallele sui cristalli.

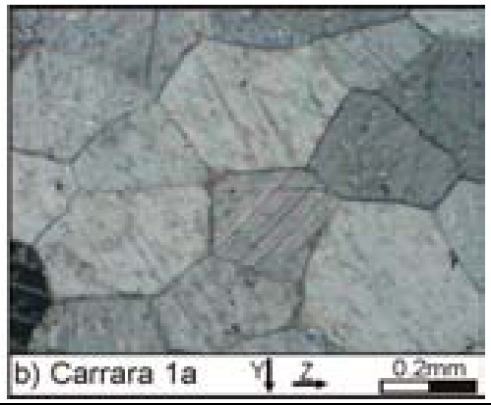

Figura 5 - Monocristalli (grani) diversamente orientati in marmo policristallino[1]:

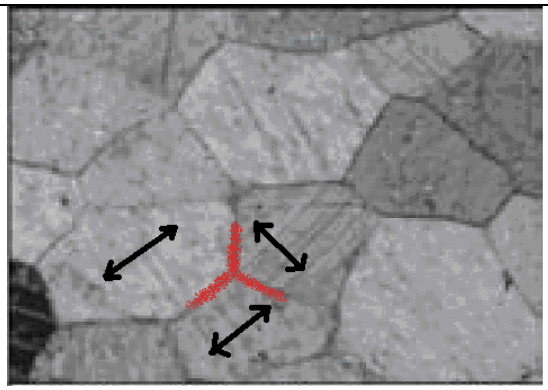

Figura 6 – Linee di contatto sollecitate dalla dilatazione

Nella Figura 6, vengono individuati 3 grani cristallini, due dei quali, a sinistra, sono isoorientati e per effetto di un aumento di temperatura si dilatano nel verso delle frecce; il terzo si dilata trasversalmente ai primi con un effetto "cuneo", che porta alla separazione dei due grani isoorientati ed alla perdita di contatto con essi; la foto della Figura 7 mostra i notevoli fenomeni di decoesione verificatisi in una lastra di marmo di Carrara dell' Amoco Building[2] con un imbarcamento di 22 mm.

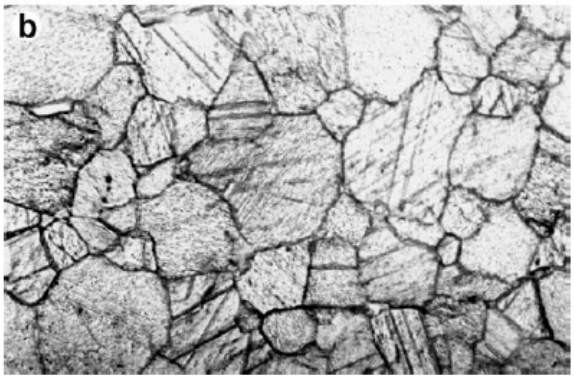

Figura 7 – Decoesione dei grani cristallini

Una volta che si sia verificato lo scollamento, e in maggior misura a seguito di cicli di temperatura e in presenza di umidità e aggressivi dell'ambiente, la continuità tra i diversi grani non si può ricostituire, sia perché le superfici di contatto che a livello microscopico sembrano regolari, al livello submicroscopico del reticolo cristallino sono invece grandemente frastagliate, sia perché le sollecitazioni intervenute producono deformazioni locali di carattere viscoso nei cristalli.

2.2 Influenza dell'anisotropia cristallina e dell'umidità

Il fenomeno dello scollamento dei cristalli, con la formazione di interstizi, porta ad un aumento non recuperabile (isteresi) delle dimensioni del materiale anche a livello macroscopico (si vedano le Figura 8 e Figura 9).

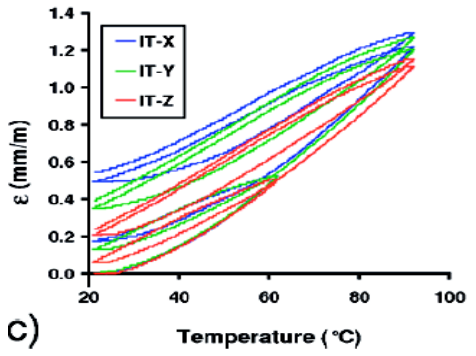

Figura 8 – Cicli su provini ricavati dallo stesso blocco in tre direzioni[3]

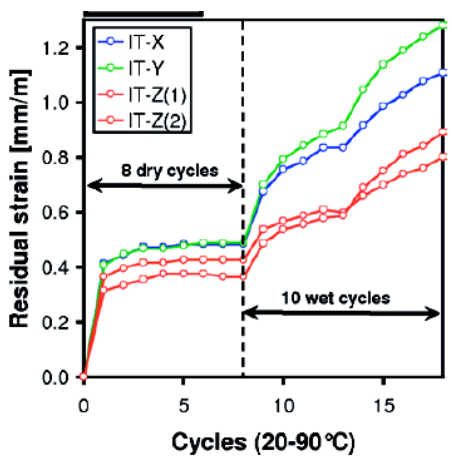

Figura 9 – Effetto di cicli secchi (dry cycles) e bagnati (wet cycles)

Se poi i grani cristallini che costituiscono la lastra non sono disposti in modo del tutto casuale ma, per effetto delle pressioni subite, si presenta un certo grado di orientazione preferenziale degli assi cristallografici, ovvero se sono presenti piani di foliazione (è il caso più frequente), all'interno della lastra o del blocco dal quale viene ri-

cavata, possono anche verificarsi fenomeni di imbarcamento in direzioni diverse o di segno diverso da una lastra all'altra.

Un ulteriore fattore che va tenuto in conto, è la presenza di deformazioni residue immagazzinate nella struttura, non completamente annullate a seguito di fenomeni di ricristallizzazione.

Questi effetti vengono esemplificati nella Figura 8: le curve di dilatazione per i primi cicli di riscaldamento e raffreddamento sono riferite a prismi tagliati per l'esecuzione della prova in tre direzioni ortogonali dallo stesso blocco di marmo; è evidente che le differenze nel comportamento sono macroscopiche. La stessa figura evidenzia inoltre il fatto che cicli termici eseguiti a secco, portano abbastanza rapidamente a incrementi praticamente trascurabili della deformazione residua. Nella Figura 9, viene mostrato l'effetto dell'alternanza (con cicli piuttosto severi) di cicli a secco e cicli in cui i provini vengono bagnati: l'incremento della deformazione residua è evidentissimo e raggiunge valori paragonabili a quelli che si riscontrano in sito.

2.3 Formazione di gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

In ambienti inquinati, ad esempio in città, altri fenomeni[4] contribuiscono all'irreversibilità delle dilatazioni, con la formazione di nuovi composti o di nuovo materiale cristallino negli interstizi tra i grani sconnessi.

Il primo fenomeno che si verifica consiste nella formazione di cristalli di gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), a seguito della penetrazione nella porosità del marmo di anidride solforica in presenza d'acqua (che con le anidridi forma acido solforico) e reazione con il carbonato di calcio. La porosità iniziale del marmo è ridotta, tipicamente frazioni di percento in volume, ma cresce progressivamente con la decoesione e le microfratture.

I cristalli che si formano si depositano nelle cavità, incluse le microfratture, contribuendo ad impedire il ritorno alla forma planare originaria e causando allungamento e imbarcamento.

2.4 Formazione di calcite

Il secondo fenomeno che porta alla formazione di cristalli nelle fratture del marmo consiste nella dissoluzione del carbonato di calcio a seguito della penetrazione di acqua acidula per la presenza di anidride carbonica (CO_2), secondo la:

$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2$

e nella successiva riprecipitazione in forma di cristalli di calcite allorché le condizioni ambientali sono favorevoli all'essiccamento del marmo.

2.5 Effetti dei cicli gelo-disgelo

La decoesione cristallina, comporta una maggiore porosità del materiale, la quale causa una maggiore sensibilità agli effetti dei cicli di gelo e disgelo.

3. L'imbarcamento‡ delle lastre di marmo sottili

Nei paragrafi precedenti sono stati descritti alcuni fenomeni, in buona misura irreversibili, che interessano il marmo, in particolare: scollamento di cristalli, formazione di microfessure e precipitazione di fasi di neoformazione, che si verificano a carico del marmo esposto all'aperto e quindi soggetto a cicli di temperatura e bagnamento.

Da questi fenomeni derivano variazioni dimensionali, ovvero espansioni permanenti.

Nel caso ipotetico in cui:

- la grana cristallina del marmo fosse perfettamente omogenea, se non vi fossero cioè fenomeni di orientazione preferenziale a livello locale degli assi cristallografici (foliazione) causati da ricristallizzazione sotto pressione,
- le condizioni di esposizione fossero omogenee sulle varie facce di elementi di marmo,
- non esistessero vincoli meccanici capaci di ostacolare la deformazione, o carichi eccentrici,

alle variazioni dimensionali non farebbe seguito alcuna deformazione macroscopica del materiale del tipo che interessa le lastre di marmo§.

Le lastre applicate per i rivestimenti degli edifici, dato il loro limitato spessore, ed avendo intradosso ed estradosso sempre esposti in modo alquanto diverso sia per quanto concerne i cicli di temperatura sia per gli attacchi chimici dell'ambiente, subiscono deformazioni differenziali, cioè "imbarcamento" aggravate spesso dalla presenza di vincoli che ostacolano le deformazioni.

L'importanza dello spessore è molto significativa. Se le lastre sono troppo sottili, uno spessore importante della lastra è interessato dal fenomeno della decoesione, mentre per elementi di spessore elevato la parte interna, meno interessata dal contatto con l'ambiente e che quindi tende a deformarsi in minor misura, si oppone ai fenomeni e li riduce. Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si nota l'assenza dell'imbarcamento a circa 50 anni di una lastra di marmo da 15 cm (cimitero Verano in Roma); tuttavia la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra l'imbarcamento a lungo termine di una lastra di marmo di spessore analogo.

---

‡ La parola "imbarcamento" si riferisce nella presente relazione alla deformazione "spontanea" e permanente che si osserva su lastre di marmo (ed altre rocce) esposte a cicli di temperatura quotidiani e stagionali, in ambiente generalmente aggressivo. In letteratura si incontrano i termini inglesi: bowing (inarcamento o imbarcamento spontaneo), bending (inflessione sotto carico), warping (inarcamento con la concavità verso l'intradosso) e curling (inarcamento con la concavità verso l'estradosso).

§ Ciò non significa tuttavia che il marmo non sarebbe ugualmente danneggiato; è infatti molto comune l'alterazione dei marmi dei monumenti esposti all'aperto, per l'effetto combinato di cicli termici e di inquinamento, anche in quei casi in cui, per le notevoli dimensioni degli oggetti, non si osservano deformazioni tipo imbarcamento.

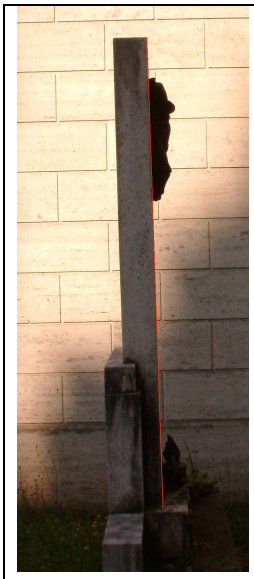

Figura 10- Lastra non inflessa dopo 50 anni.

Fig. 5. Carrara marble headstone at the point of collapse in Kensal Green Cemetery, London, in 1984.

Figura 11 - Lastra imbarcata a lungo termine (crollata nel 1985)

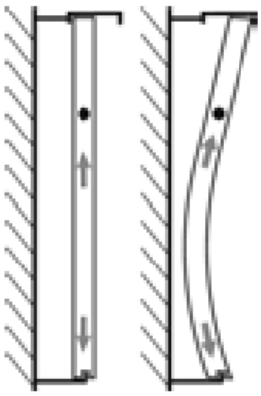

Figura 12 – Asimmetrie nel fissaggio causano deformazioni asimmetriche

3.1 Deformazioni e fenomeni di isteresi

Se per qualche motivo, spesso per le modalità di montaggio delle lastre, che normalmente non assicurano loro una completa libertà nei movimenti, si generano sollecitazioni meccaniche cicliche, queste, sovrapponendosi ai fenomeni di dilatazione termica, causano inizialmente l'estendersi della microfessurazione per decoesione e successivamente la formazione di fessurazione intergranulare, con evidenti aumenti dell'effetto irreversibile di danneggiamento.

Diversi Autori hanno evidenziato effetti di deformazioni per effetto delle sole sollecitazioni meccaniche ripetute (v. Figura 13 e Figura 14) e in assenza di variazioni di temperatura [5,6,7].

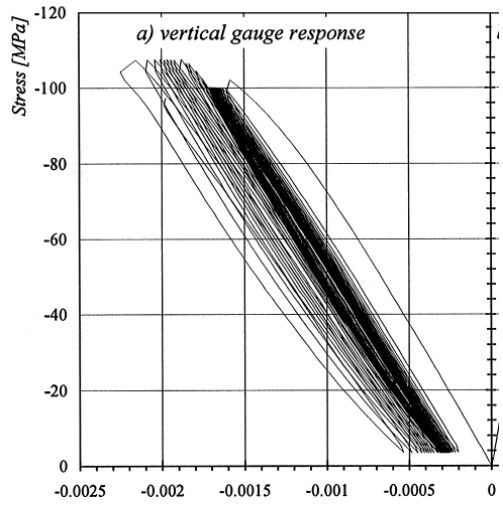

Figura 13 – Contrazioni permanenti (0,5 ‰) a seguito di 63 cicli di carico a tem-

Figura 14 – Frattura intergranulare su marmo di Carrara ciclato (Royer)

peratura ambiente (Royer, citato)	

Si tratta di un aspetto di estrema rilevanza: il comportamento sopra descritto è assimilabile infatti ad una deformazione di carattere viscoso in risposta a sollecitazioni cicliche, nel senso che le sollecitazioni, anche una volta rimosse, inducono nel materiale consistenti deformazioni permanenti.

3.2 Effetto degli ancoraggi

Anche la presenza e il tipo degli ancoraggi può avere un effetto notevole sullo sviluppo degli imbarcamenti.

Queste deformazioni delle lastre infatti possono trovare un ostacolo nei vincoli che li mantengono in posizione, creando una condizione di coazione che influisce sulla curvatura (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, da Koch, citato), contribuisce ai fenomeni viscosi di deformazione dei cristalli e dà anch'essa un contributo al loro scollamento. Anche per questo aspetto, è evidente che le variazioni di temperatura producono cicli di sollecitazione sul marmo.

Le coazioni suddette non derivano unicamente dal fatto che la lastra si incurva; si deve considerare che in effetti l'intera lastra si allunga, sia all'estradosso sia, in minor misura per la diversa esposizione, all'intradosso: l'effetto di imbarcamento è dovuto quindi al differenziale della dilatazione[**]. Se la lastra venisse cioè riscaldata e raffreddata su entrambe le sue facce, non si osserverebbe alcun imbarcamento, bensì un allungamento permanente. È però evidente che questa ultima considerazione può essere applicata solo nel caso (teorico) in cui nel marmo non siano presenti tensioni all'origine o anisotropia macroscopica dell'orientazione dei grani.

3.3 Deformazione e coazioni

L'osservazione dell' imbarcamento delle lastre potrebbe condurre intuitivamente ad immaginare uno stato di coazione di natura elastica, con elevate sollecitazioni sul marmo agli ancoraggi[††]. Questo quadro non è del tutto realistico; si deve infatti considerare che ad ogni ciclo termico o a seguito dello svilupparsi di cause di deformazione, come i fenomeni sopradescritti, possono generarsi stati coattivi ai quali però si accompagnano deformazioni permanenti (scollamento ed allontanamento dei grani cristallini) che a loro volta riducono le tensioni.

A conferma di questa considerazione si rileva che gli imbarcamenti non sono "elastici" ma vengono mantenuti anche dopo la rimozione delle lastre dai supporti.

[**] In merito a questo importante aspetto della dilatazione (cioè l'allungamento, l'estensore della presente nota non hanno trovato alcun riferimento nella letteratura

[††] Nello studio della letteratura effettuato, non si sono incontrati dati relativi allo stato coattivo ed alle sollecitazioni in sito

4. Indebolimento del marmo

L'effetto macroscopico forse meno evidente ma più importante dei fenomeni descritti ai punti precedenti, è la perdita di resistenza a flessione che si accompagna al progressivo imbarcamento.

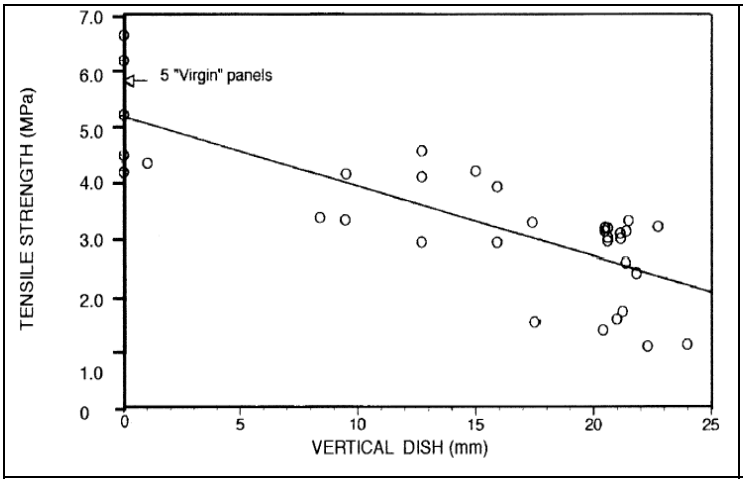

Figura 15 - Misure di resistenza a trazione su lastre dall'Amoco Building

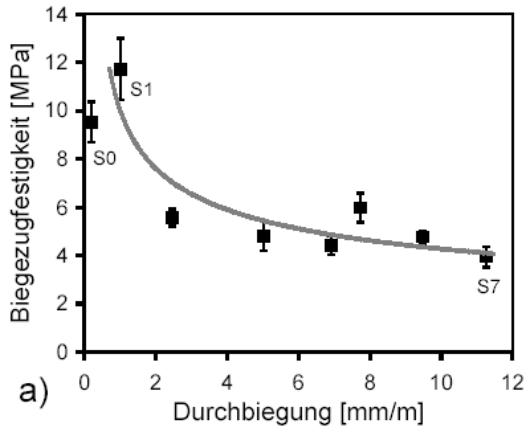

Figura 16 – Resistenza a trazione per flessione in funzione del piegamento

Numerosi studi riportati in letteratura evidenziano questo indebolimento: ad esempio Logan (citato) ha eseguito misure di resistenza a trazione su lastre di marmo di Carrara, aventi concavità (dish) in media di 18 mm provenienti dall'Amoco Building (a 17 anni dall'istallazione) e da un edificio in Toronto (di 27 anni), evidenziando una perdita prossima al 50% rispetto ai pannelli non impiegati (Figura 15). Risultati analoghi, con perdita di circa il 60%(Figura 16), sono stati ottenuti da Koch (citato).

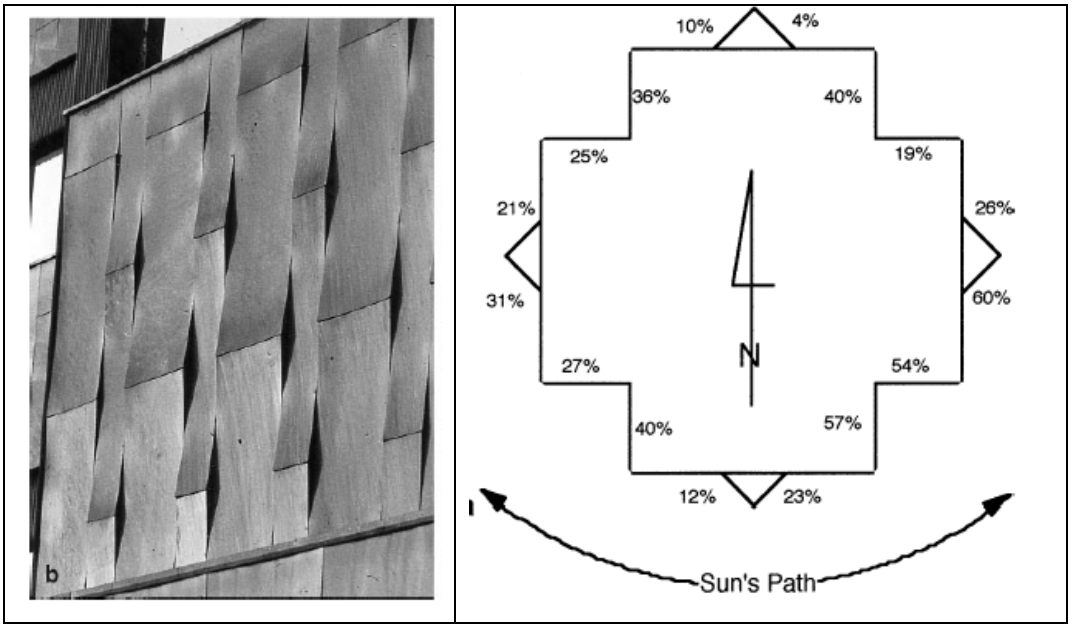

Figura 17 – Le lastre della Finlandia Hall di Helsinki, pur molto deformate, non sono cadute[8]	Figura 18 – Percentuale di lastre danneggiate in funzione dell'esposizione (Amoco Building, da Logan, citato)

Nei casi citati non si sono manifestate rotture e cadute generalizzate delle lastre (Figura 17): al manifestarsi dell'imbarcamento si sono però avviate indagini, che evidenziando la riduzione di resistenza ne hanno fatto ritenere indispensabile la sostituzione.

Anche questo fenomeno è direttamente collegato all'anisotropia del materiale, ad esempio Koch e Siegesmund (citati) riportano per un marmo di Carrara una perdita di resistenza di circa il 60% applicando la sollecitazione di trazione nella direzione in cui si riscontra l'orientamento prevalente dell'asse z e di circa il 40% nelle direzioni ortogonali.

5. Un caso di Studio: fenomeno verificatosi all'inizio del XXI secolo su un gruppo di Edifici Pubblici in Italia centrale

In questo punto verranno discussi alcuni aspetti specifici dei fenomeni verificatisi sugli edifici citati.

5.1 Entità dei fenomeni riscontrati

Il fenomeno rilevato sulle facciate in esame, non può essere definito macroscopico: dopo dieci anni circa dall'inizio della posa in opera delle lastre, la numerosità dei difetti e la loro entità risulta piuttosto limitata, considerando il numero totale di più di 40000 elementi; le lastre cadute si contano infatti sulle dita di una mano e quelle su cui si è intervenuti per migliorarne la stabilità a seguito di una campagna di indagini, non superano le 50 unità. Neppure l'entità degli imbarcamenti appare rilevante: nel rapporto presentato dal Politecnico di Torino, la freccia massima riscontrata supera di poco i 10 mm.

La resistenza a flessione delle lastre, secondo i dati del Politecnico risulta ridotta all'incirca del 50%.

I fenomeni più vistosi sono concentrati sulle facciate Sud, in accordo con varie indicazioni della letteratura (si veda ad esempio la Figura 18).

Qui si è avuta l'importante caduta di una lastra[9], ma si è anche riscontrata una notevole anomalia nel montaggio, consistente nel taglio dei perni di ancoraggio, con il supporto della lastra affidato unicamente all'impiego del collante, che evidentemente si è rivelato il punto debole, anche se lo strappo si è prodotto a carico del marmo, a sua volta indebolito per i fori di ancoraggio.

In base all'entità dell'imbarcamento, è possibile valutare l'allungamento differenziale (v. punto 3.2) manifestato dalla superficie di estradosso di una lastra. Con riferimento

alla massima freccia riscontrata sulle lastre degli, pari a circa un centimetro, e considerando che la distanza tra i supporti è di 60 cm, si può valutare facilmente una dilatazione differenziale pari a circa 7,24 x 10^{-4}, ovvero 0,74 mm/m; in letteratura si incontrano anche valori alquanto più elevati.

Se fosse completamente libera, ovvero se gli ancoraggi consentissero la completa mobilità, questa dilatazione non comporterebbe la nascita di sollecitazioni meccaniche. Se al contrario la dilatazione fosse completamente impedita, si svilupperebbero delle sollecitazioni molto elevate.

Per valutare un ordine di grandezza, si consideri che per produrre una contrazione di questa entità su una lastra mediante un carico di compressione centrato, sarebbe necessaria una sollecitazione $\sigma = E \cdot \varepsilon = 65.000 \times 7{,}24 \times 10^{-4} = 48$ MPa, che considerando l'area della sezione della lastra pari a circa 30.000 mm^2, corrisponde a una forza di 1440 kN ovvero 144 T. Naturalmente si deve considerare che nel nostro caso si può parlare di carico di punta, e che sollecitazioni di questo tipo eccederebbero di molto la resistenza del materiale.

Inoltre, come si è detto in precedenza, alle deformazioni sotto carico si accompagnano notevoli fenomeni viscosi, cosicché le sollecitazioni effettive concentrate sugli ancoraggi sarebbero di gran lunga più piccole, anche se questi non avessero possibilità di movimento. Nel nostro caso il sistema di innesto "a baionetta" consente certamente una buona mobilità verticale; quanto alla mobilità orizzontale la libertà di movimento consentita è buona, ma legata anche alla precisione del montaggio. Si deve tener conto del fatto che in edilizia non è possibile rispettare tolleranze troppo strette.

Infine, anche se lo stato di sollecitazione in sito deve essere limitato, proprio a causa dei fenomeni viscosi, non va dimenticato che esso agisce su una zona della lastra intrinsecamente e sistematicamente indebolita per la modalità di ancoraggio.

5.2 Attività successive all'osservazione dei fenomeni

Avendo rilevato problemi di imbarcamento e avendo riscontrato il difetto esecutivo a seguito della caduta della lastra suddetta, si è proceduto ad un'indagine su tutte le lastre, finalizzata ad individuare altre situazioni dello stesso tipo. I risultati hanno permesso di individuare un numero limitatissimo di difetti esecutivi (meno di uno su mille lastre), che sono stati sanati.

Sono state poi eseguite prove di trazione sugli ancoraggi e prove di carico statico sulle lastre in sito, allo scopo di verificare la resistenza delle lastre ai carichi di progetto.

I risultati ottenuti sono stati positivi in 12 casi su 13; Il caso negativo si è verificato a seguito del cedimento del marmo che sostiene i perni di ancoraggio.

5.3 Prevedibile evoluzione dei fenomeni

A parere di chi scrive, l'evoluzione dei fenomeni è facilmente prevedibile alla luce delle informazioni della letteratura scientifica e di quanto si è verificato negli importanti casi conosciuti.

I fenomeni di imbarcamento diventeranno progressivamente più importanti interessando in sequenza anche le facciate non esposte verso sud-est; le sollecitazioni su alcuni ancoraggi aumenteranno di intensità mentre la resistenza del marmo diminuirà di molto; nel tempo, pur se sporadicamente, è inevitabile che si verifichino fessurazioni delle lastre e nuovi distacchi, anche se i sistemi di ancoraggio fuori progetto sono stati individuati ed eliminati.

Neppure l'adozione di differenti tipi di ancoraggio, finalizzata ad evitare che il punto di supporto coincida con un punto indebolito, potrebbe interrompere il processo deformativo.

La percezione dei crescenti fenomeni di imbarcamento e indebolimento e la necessità di garantire la sicurezza condurranno immancabilmente alla progressiva rimozione delle lastre ed alla loro sostituzione con materiali più idonei, non soggetti ad imbarcamento.

Eventualmente si procederà all'applicazione di prodotti idrofobizzanti per impedire la penetrazione dell'acqua e i fenomeni a questa legati: questi interventi non saranno risolutivi; comunque la decoesione di origine termica produrrà nel tempo aumenti degli imbarcamenti e diminuzione della resistenza.

6. Conclusioni

I problemi a carico delle facciate ventilate del caso esaminato, non dovevano sorprendere nessuno.

Erano facilmente prevedibili, ed erano inevitabili.

Indipendentemente dalla qualità degli ancoraggi (sia rispondenti al progetto e indeboliti nei punti più sollecitati, sia anomali), la decoesione cristallina, legata alle caratteristiche di anisotropia strutturale del marmo policristallino di spessore limitato, avrebbe prodotto gli imbarcamenti che si sono puntualmente verificati, accompagnati da preoccupanti ed inaccettabili perdite di resistenza meccanica.

Anche se gli approfondimenti scientifici sono più recenti, i fondamenti fisici e le conseguenze pratiche erano ben noti ancor prima che venisse posato il primo pannello.

I difetti di posa in opera hanno giocato un ruolo assolutamente marginale nella genesi dei problemi, anzi sono risultati utili per favorire una percezione anticipata dei fenomeni in atto, sollevando per tempo il problema della sicurezza.

La responsabilità dell'impresa risiede nella posa in opera non corretta di meno di una lastra su mille ma è quantificabile in proporzione di gran lunga minore rispetto al totale del danno.

Infatti, anche se le lastre su cui si è intervenuti avessero avuto gli ancoraggi di progetto, sarebbero comunque rientrate nel quadro evolutivo sopra prospettato (v. 5.3).

7. Riferimenti bibliografici

[1] A. Koch: "Deformation von Fassadenplatten aus Marmor - Schadenskartierungen und gesteinstechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden" Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades - Universitätsverlag Göttingen – Pag. 65 (2006)

[2] J. M. Logan: "Laboratory and case studies of thermal cycling and stored strain on the stability of selected marbles" , Environmental Geology, 46, 456 (2004)

[3] A. Koch , S. Siegesmund: "The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble", Environmental Geology, 46, 350 (2004)

[4] C.M. Grossi and P. Brimblecombe: " The effect of atmospheric pollution on building materials", Phys. IV France 12 10,197 (2002)

[5] G. Royer-Carfagni, W. Salvatore: "The characterization of marble by cyclic compression loading: experimental results", Mech, Cohes.-Frict. Materials, 5, 535 (2000)

[6] S. Cattaneo e J. Labuz:" Damage of Marble from Cyclic Loading", J. Mat. in Civ. Engrg., Volume 13, 459 (2001)

[7] U. Lindborg: "Fatigue-induced shape change in marble", Mechanisms and Mechanics of Fracture: The John Knott Symposium; Columbus, OH; USA; 7-10 Oct. 269 (2002)

[8] S. Siegesmund e altri :"Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion", Intern. Jour. Earth Sci., 89, 170 (2000)

[9] Rapporto presentato dall'Impresa del 5.09.2005