

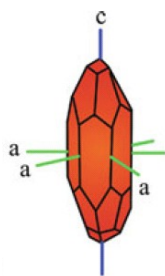
Bowing

Tutto quello che dovrete sapere

Sollecitazioni IGROTERMICHE

La sollecitazione termica dei marmi rappresenta un problema molto critico. L'osservazione di base è che la calcite (e anche subordinatamente la dolomite) reagiscono in maniera del tutto anormale relativamente alle sollecitazioni termoisolate. Nella direzione dell'asse cristallografico "c" la calcite

Figura 1



presenta un coefficiente di dilatazione termica di $26 \times 10^{-6} \text{ mK}^{-1}$ ($25 \times 10^{-6} \text{ mK}^{-1}$ per la dolomite), nei piani in posizione normale rispetto all'asse "c" un coefficiente di $-6 \times 10^{-6} \text{ mK}^{-1}$ ($6 \times 10^{-6} \text{ mK}^{-1}$ per la dolomite) (fig. 1, da Kleber 1959 e Markgraf & Reeder, 1985). Con il riscaldamento, il cristallo di calcite si dilata pertanto in una direzione, mentre si contrae nelle direzioni opposte (fig. 2).

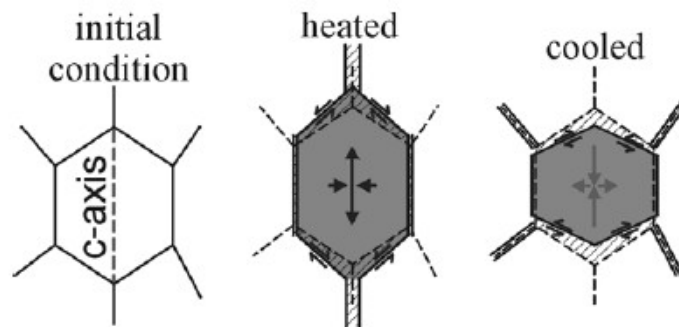


Figura 2: cambio di forma in funzione della temperatura

Nel marmo quindi, materiale policristallino, a causa delle oscillazioni di temperatura, in base all'orientamento dei singoli cristalli, si ha la formazione di sollecitazioni di trazione, di compressione e di taglio al bordo dei grani.

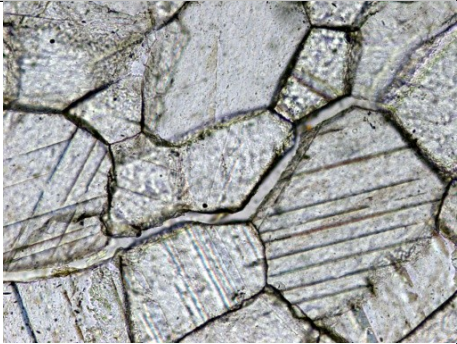
(Verificare se il siberian)

Queste sollecitazioni in alcuni varietà di marmi inducono la formazione di nuove microfessure a bordo grano (fenomeno chiamato decoesione granulare – vedi foto)

Sottoposto a sollecitazione termica la densità di microfessure per unità di volume aumenta. Superato un valore critico di densità di microfessure il meccanismo di rottura della pietra cambia: la rottura che normalmente è di tipo transgranulare (rotture di clivaggio all'interno dei cristalli) diventa una frattura di tipo intergranulare. (rotture a bordo grano) e le caratteristiche meccaniche decadono vistosamente.

Il fenomeno di modificazione cristallina dei corpi solidi anche a temperature relativamente basse è un dato oramai noto in svariati settori della meccanica del corpo rigido, per esempio gli acciai modificano il loro reticolo cristallino già a 150°C

Non deve stupire quindi se alcuni marmi presentano comportamenti "anomali" a $60 - 70^{\circ}\text{C}$.

	Decoesione granulare spinta in marmo bianco Gioia. Come si può osservare l'allineamento di delle fratture a piccola scala (microfratture) produce un difetto intergrano visibile anche a occhio nudo
	Ingrandimento di un particolare. E' possibile notare che in alcuni cristalli manca completamente il legame del bordi del grano con la propagazione di una frattura a bordo grano.

Nel settore del marmo il fenomeno è salito alla ribalta con l'utilizzo massiccio di pietre a spessori dell'ordine di qualche centimetro esposte a sbalzi termici. In questo caso l'effetto della decoesione granulare si trasforma nel meccanismo principale di rottura. Bisogna ribadire che non tutti i marmi si comportano alla stesa maniera. Alcuni marmi non sono termosensibili, o meglio non lo sono a temperature nell'ordine dei 60 – 70°C, deve essere chiaro quindi che tra le 200 varietà di marmi del bacino apuo versiliese solo alcuni presentano patologie che andremo a descrivere più avanti, altri non sono né termosensibili né presentano problemi di durabilità se sottoposti a attacchi termici in ambiente umido.

Dal punto di vista scientifico non esiste ancora un modello micromeccanico di rottura soddisfacente che definisca la modalità di rottura termoindotta, ma d'altro canto nel mondo della meccanica delle rocce gli studi sulle pietre lapidee in generale e marmi in particolare è molto limitato sia a livello di ammasso roccioso che di comportamento a piccola scala.

Ciò non significa che sia un limite della meccanica delle rocce, ma semplicemente non c'è mai stato un interesse a capire determinati fenomenologie di rotture; o meglio l'interesse c'è stato solo negli ultimi anni e esclusivamente per pochi centri di ricerca del nord europa, che a tutt'oggi sono i maggior esperti mondiali sulla meccanica dei marmi a piccola scala.

La meccanica delle rocce è quindi argomento troppo vasto e estremamente vario sia come problematiche che come tipi di rocce. I modelli risultano generici e sono quindi inadeguati e fallimentari, sia a piccola scala (decoesione – imbarcamento) che a grande scala (stabilità di ammassi rocciosi, gallerie sotterranee).

Fortunatamente sulla piccola scala il clamoroso danno del marmo alla Finlandia Hall ha creato un nuovo polo di ricerca tra SINTEF e l'università di Ghottingen (Germania), solo da qualche anno quindi si è assistito alla nascita della meccanica del marmo a piccola scala.

Dal punto di vista tecnico abbiamo circa un secolo di ritardo rispetto allo studio sui metalli. Al contrario di quello che pensa l'opinione comune i metalli hanno presentato dei problemi devastanti risolti con la definizione di modelli micromeccanici di rottura oramai molto affidabili (ma ci sono volute numerose navi affondate, treni rotti ed aerei comet precipitati).

Deve essere chiaro che il modello di comportamento a grande scala di un marmo deriva dal modello micromeccanico di rottura. E' quindi fondamentale (come è stato fondamentale per i metalli) partire dagli studi sui cristalli sulle loro interazioni e sulle modificazioni indotte dalla temperatura e dall'umidità (sia allo stato solido – ghiaccio che vapore) per proporre un valido modello di rottura. Il tutto è complicato dall'anisotropia del marmo sia dal punto di vista meccanico (modulo elastico, rigidezza..) ma anche fisico (permeabilità). Per esempio sul marmo già decoeso è stato osservato che il verso ha una permeabilità maggiore rispetto al resto della matrice rocciosa. Come si può vedere dalle foto è stato trattato il marmo è stato trattato con liquido penetrante rosso.



Dopo qualche ora il liquido è arrivato all'altra faccia passando prioritariamente dai minerali del verso. Come si può notare dalle foto in questo marmo il verso introduce un fattore che difficilmente può non essere preso in considerazione in un modello micromeccanico di durabilità dove l'umidità e quindi la sua modalità di trasmissione gioca un ruolo fondamentale.

	Faccia inferiore: il liquido penetrante è arrivato seguendo la direzione del verso
	Faccia inferiore – il penetrante comparso sul disegno del verso



Il presente articolo vuole ripercorrere le tappe fondamentali della meccanica dei marmi a piccola scala (dove per piccola scala si intendono le fenomenologie legate ai problemi di durabilità per i rivestimenti esterni) a partire dai articoli di Frazini nel 1983 sui marmi cotti per effetto della temperatura, per arrivare ai risultati odierni sull'influenza dell'umidità per la interpretazioni di fenomeni come il bowling e l'espansione volumetrica.

Nel 1983 Franzini proponeva nell'articolo "Degradazione del marmo per effetto della temperatura" una bozza di modello microstrutturale qualitativo che teneva conto della decoesione granulare per effetto della temperatura (il materiale decoeso veniva chiamato "marmo cotto" dagli autori prendendo a prestito una terminologia tutt'ora in uso dai cavaatori). I parametri analizzati sono il coefficiente di imbibizione, il modulo di elasticità flessionale e le caratteristiche tessiturali. Per quanto riguarda il modulo di elasticità flessionale è stato dimostrato che un riscaldamento a 100°C per 3 ore induce una diminuzione variabile da 18% sino a 76% in relazione al tipo di marmo. Per quanto riguarda il coefficiente di imbibizione la sola procedura di essiccazione del test a 105 °C induce un aumento del coefficiente di imbibizione variabile da 43% sino a 133%. Franzini et al. correlano l'aumento dell'imbibizione con l'aumento della porosità "semichiusa" e/o intergranulare: la quota parte di porosità il cui meccanismo è legato esclusivamente all'esistenza e allo sviluppo delle microfratture esistenti tra grano e grano. Per quanto riguarda le caratteristiche tessiturali c'è da evidenziare come vari test a varie temperature (anche 500°C) non hanno portato ad un aumento significativo delle geminazioni, ma solo ad un aumento delle microfessure a bordo grano. L'indipendenza delle geminazioni con la temperatura esclude quindi tutta una parte della meccanica

dei corpi rigidi (vedi metalli) legata alla neoformazione di geminati e forse anche alle dislocazioni atomiche. Quindi dagli elementi a nostra disposizione per ora dobbiamo credere che il danno termindotto non provoca spostamenti di elettroni e quindi propagazioni e dislocazioni di difetti lineari. Gli autori concludono dalle osservazioni in sito che il fenomeno della cottura si innesca a partire da temperature dell'ordine di qualche decina di gradi centigradi, ma il dato non è supportato da evidenze sperimentali.

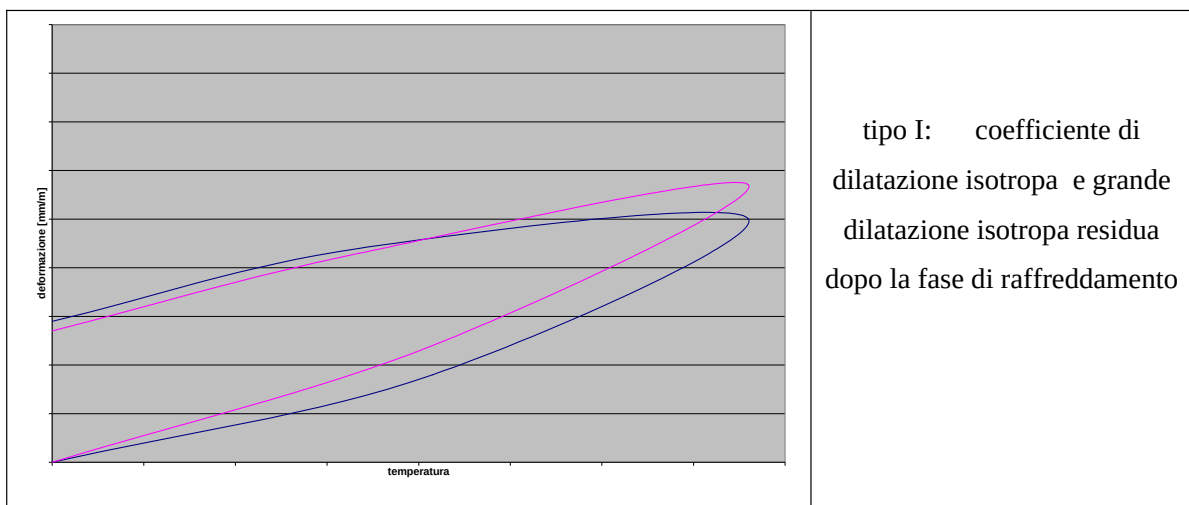
Dall'83 bisogna aspettare circa 20 anni prima che qualcuno si ripresenti sul panorama scientifico parlando della durabilità dei marmi.

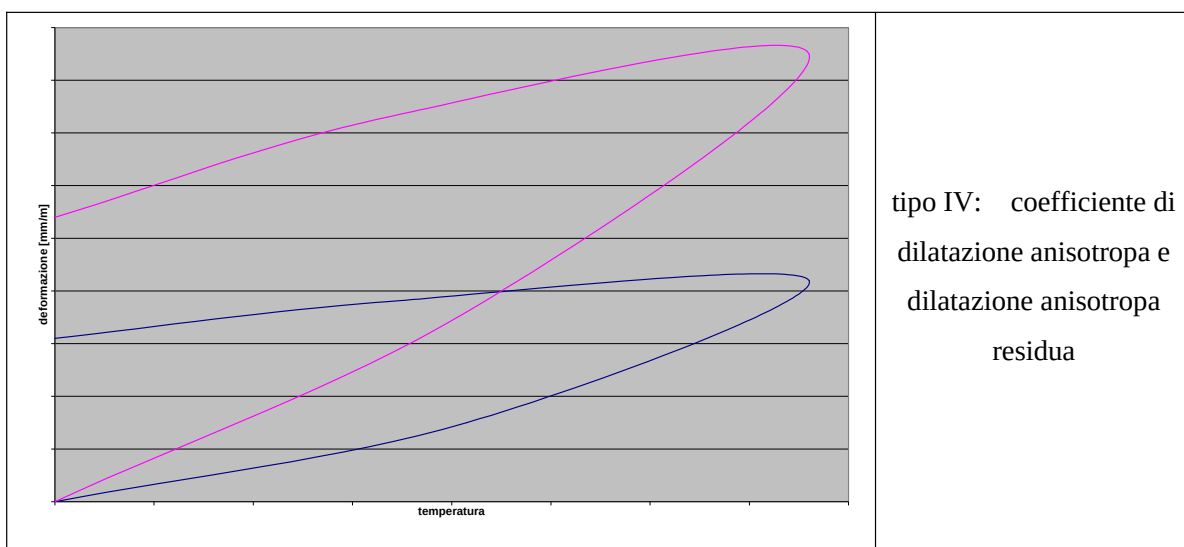
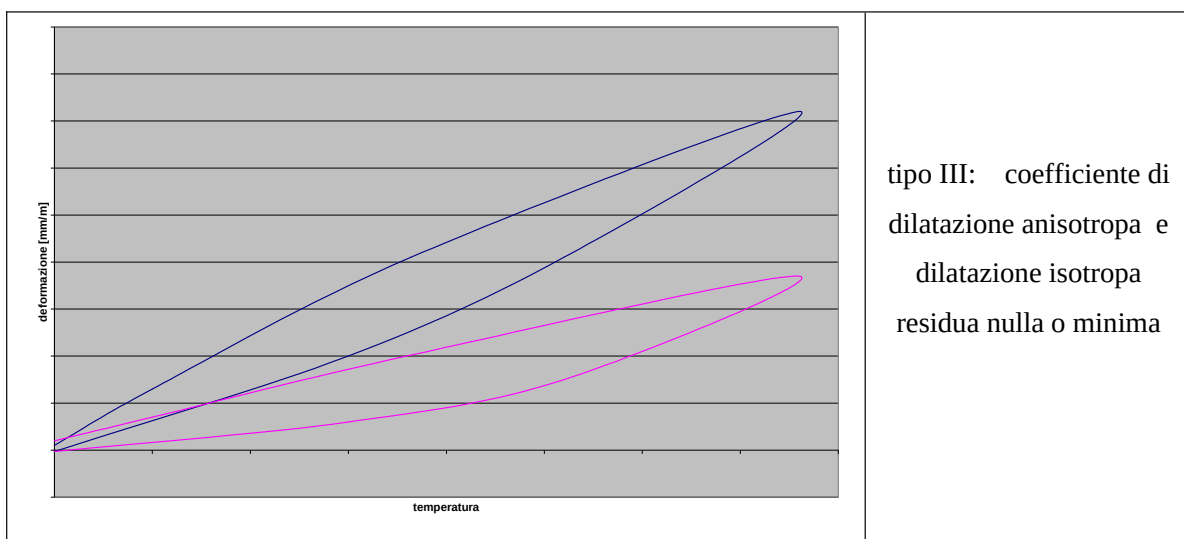
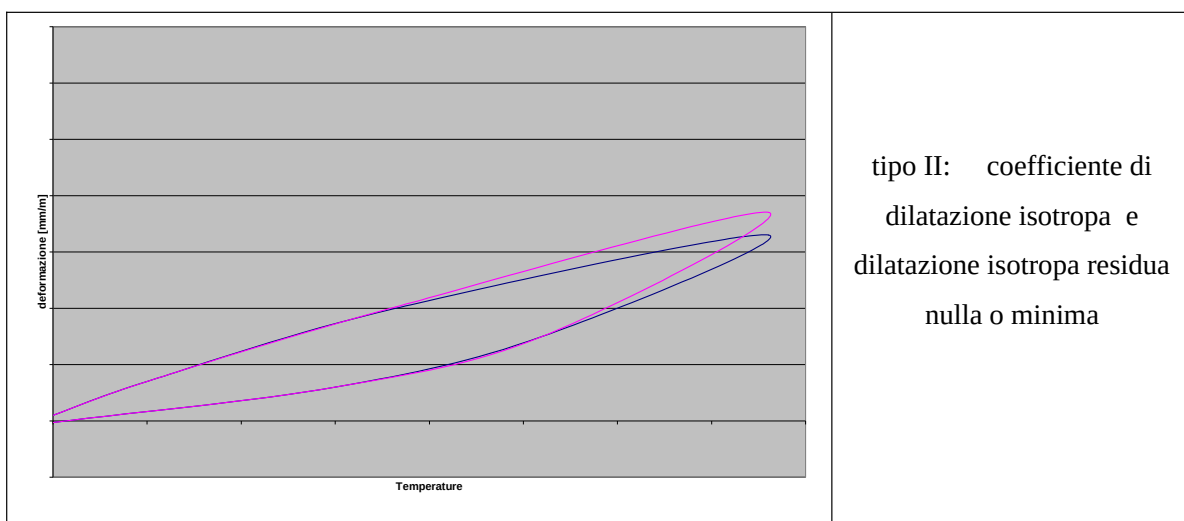
Nel frattempo i marmi della Finlandia Hall posati nel '71, voluti dal progettista arch. Alvaar Aalto, accusano il fenomeno del bowing, già nel 1985 alcune lastre si erano piegate di ben 5 cm. Qualche anno più tardi tocca ad un altro caso emblematico: l'Amoco Building.

	Il grattacielo finito nel 1974 è stato completamente rivestito in marmo. Il marmo scelto si è rivelato subito termosensibile e con problemi di bowing. Nel 1988 il 30% dei 44.000 pannelli presentava un piegamento maggiore di 1,5 cm. Il marmo è stato tutto sostituito con altra pietra con un costo di circa 1/3 dell'intero grattacielo.
--	--

Intorno alle problematiche della Finlandia Hall grazie al Public Work Department of Helsinki City la UE finanzia il primo progetto destinato a gettare le basi della meccanica del marmo. Il progetto si chiama Developing long term durability of marble facades, abbreviato con il nome di MARA.

Le dimensioni del danno termoindotto dipendono essenzialmente, oltre che dall'anisotropia del monocristallo, dall'orientamento dei singoli cristalli di calcite dalla forma e dalle dimensioni dei loro grani (Siegesmund et al. 2000). Zeisig et al. 2002 analizzano gli effetti sulla diminuzione della resistenza termica e quindi, sull'alterazione fisica provocata da agenti atmosferici, basandosi sull'esempio di analisi sistematiche condotte su 18 marmi. Il coefficiente di dilatazione α , che descrive l'esatta variazione della lunghezza durante la fase di riscaldamento e di raffreddamento, dipende dall'intervallo di temperatura considerato di volta in volta. A livello generale si può constatare che la dilatazione termica aumenta con l'aumento della temperatura e, una volta avvenuto il raffreddamento, nella maggior parte dei casi, non ritorna allo stadio iniziale (Fig. 1). La dilatazione residua restante progredisce con variazioni nella lunghezza e nel volume che trovano spiegazione nella formazione progressiva di microfratture. A titolo riepilogativo Zeisig et al. (2002) sono riusciti a classificare quattro tipi di comportamento di dilatazione diversi (vedi fig.):

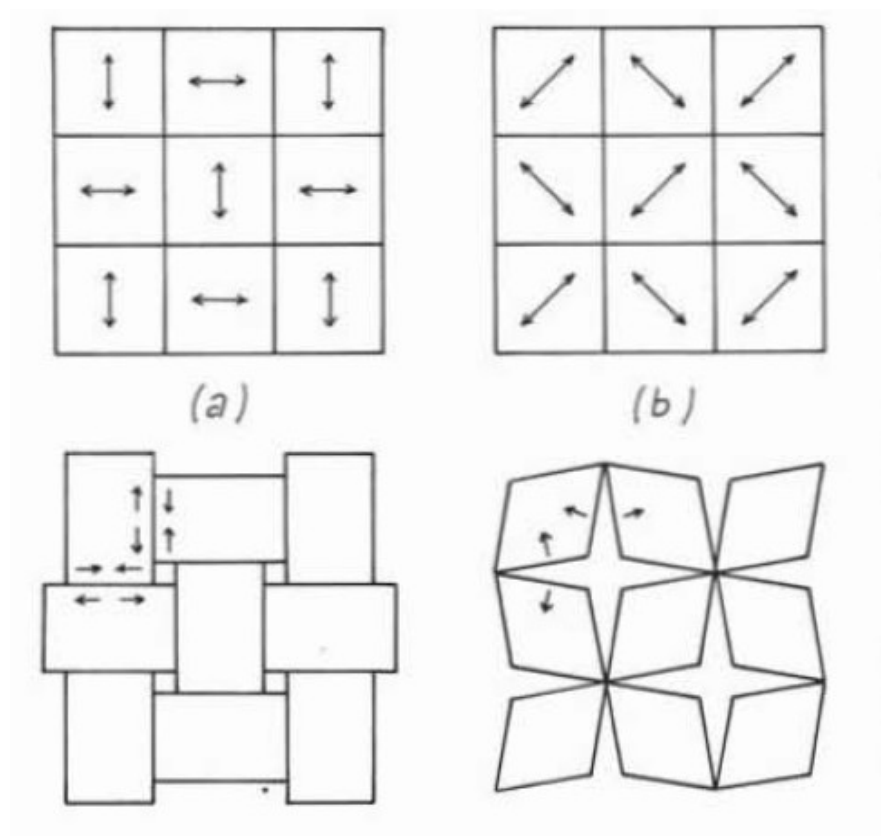




l'effetto termoindotto si innesca proprio al bordo grano, dove la dilatazione termica provoca la propagazione delle microfratture indebolendo ulteriormente il legame tra i cristalli. Il fenomeno è stato studiato da numerosi autori; già

si distinguono due tipi di porosità: una "aperta" o intergranulare e una "semichiusa" intra e/o intergranulare. L'aumento del coefficiente di imbibizione dopo riscaldamento a 100°C è causato dall'aumento della porosità semichiusa a seguito di un distacco tra i grani di calcite.

Il fenomeno della decoesione granulare in alcuni marmi si innesca a temperature relativamente basse: è stato dimostrato che già temperature di $40 - 50^{\circ}\text{C}$ sono sufficienti. .



A tale riguardo si sono potuti ricavare la composizione chimica, la grandezza e la forma dei grani, la geometria dei bordi dei grani, la struttura e l'influenza di microfessure preesistenti in quanto

parametri critici per la diminuzione di resistenza termoidotta. Gli aspetti fisico-costruttivi così come altre grandezze di influenza estrinseca (ad es. condizioni climatiche) restano in un primo momento completamente invariati.

Fig. 1: modelli base di dilatazione termica nel marmo. I marmi possono presentare una dilatazione isotropa (a, c) o anisotropa (b, d). Allo stesso modo, nei marmi termosensibili è possibile osservare una dilatazione residua permanente dopo un'unica azione di riscaldamento, mentre i marmi che non sono termosensibili ritornano alla loro lunghezza originaria (a, b). Le frecce indicano l'andamento della curva in caso di riscaldamento o di raffreddamento dei campioni.

Nei paragrafi che seguono vengono eseguite delle analisi su campioni con un diverso orientamento degli elementi strutturali. Ciò serve a determinare l'influenza della dipendenza dalla direzione o, da un altro punto di vista, i valori di espansione massima e minima di un marmo. Come per altre caratteristiche fisiche, anche la dilatazione termica è una proprietà che dipende dalla direzione, cioè anisotropa e, pertanto, variabile in maniera molto netta.

Per tenere conto delle condizioni a cui un marmo è esposto quando viene utilizzato come lastra di facciata in un edificio, è necessario prendere in considerazione l'influenza dell'umidità. Gli studi fatti dimostrano che il processo di alterazione fisica provocata dagli agenti atmosferici che, da ultimo, provoca un incurvamento delle lastre che compongono la facciata dell'edificio è strettamente collegata alla dilatazione irreversibile del materiale. Ci si chiede pertanto quali siano gli influssi climatici che determinano una dilatazione residua così elevata. Dalla letteratura in materia si conoscono coefficienti di dilatazione essenzialmente più elevati (GRIMM 1999). L'influenza dell'umidità assume quindi, a tale riguardo, una funzione chiave (BUCHER1956; WINKLER 1996; KOCH & SIEGESMUND 2004B; GRELK ET AL. 2004).

L'umidità da sola però non dà luogo alla dilatazione residua. Sui campioni alcuni materiali (Peccia e Carrara) è stata misurata la dilatazione igrica, esponendo la pietra per 48 ore alla saturazione con acqua. Non si è rilevata alcuna espansione, trovando quindi conferma di ciò nei dati derivanti dalla letteratura tecnica in materia, POSCHLOD (1990), ad esempio, nei marmi di Carrara e di Laas, ha

notato, dopo un'imbibizione di 24 ore, un'espansione igrica rispettivamente di 0,006 e di 0,012 mm/m.

D'altro canto l'effetto ciclico della temperatura in condizioni asciutte causa soltanto una dilatazione residua ~~il~~limitata, che, anche in caso di successive ripetizioni, non progredisce ulteriormente (SAGE 1988). Per comprendere l'azione dell'acqua nell'esecuzione dei cicli di temperatura, i campioni Peccia, Carrara 1a e Ruivina sono stati riscaldati a 90 °C, dapprima otto volte in condizioni asciutte e successivamente, dieci volte in condizioni bagnate (Fig. 2). Si è visto che soltanto il primo ciclo di riscaldamento in condizioni asciutte provoca un incremento considerevole della dilatazione residua. La progressione della dilatazione residua si arresta tra il secondo (PE) ed il quinto (GI) ciclo. Sotto l'influenza dell'umidità la dilatazione residua progressiva cambia in modo fondamentale. Progredisce in modo continuo e l'incremento della dilatazione residua dopo dieci cicli a umido nel marmo Peccia è relativamente minimo (0,25-0,59 mm/m) e poco più elevato nel marmo Ruivina (0,27-0,76 mm/m). Il campione Carrara 1a presenta la dilatazione residua comparativamente più elevata, tra 0,80 e 1,28 mm/m.

In maniera analoga al comportamento della dilatazione residua in condizioni asciutte è possibile constatare un'accentuata anisotropia della dilatazione residua progressiva sotto l'azione igrotermica. Il marmo Ruivina evidenzia nella direzione Z, dopo dieci cicli a umido, una dilatazione residua tre volte maggiore di quella nella direzione X, dove la lunghezza del campione, dopo pochi cicli a umido, resta approssimativamente stabile. La dipendenza dalla direzione nel marmo Carrara 1a è invece ~~TOmpaiativamente~~meno accentuata.