

## STUDIO SUL CRIOCLASTISMO DELL'ALTA VALLE DI S. PELLEGRINO (DOLOMITI): INDAGINI SUL TERRENO E SPERIMENTAZIONI IN LABORATORIO

M. Soldati

Collaboratore Istituto di Geologia, Università di Modena

**RIASSUNTO** - *Studio sul crioclastismo dell'alta Valle di S. Pellegrino (Dolomiti): indagini sul terreno e sperimentazioni in laboratorio* - *Il Quaternario*, 2, n.1, 1989, p. 79-98 - La presente ricerca, svolta nell'ambito di un programma di collaborazione tra l'Università di Caen (Francia) e l'Università di Modena per studi geomorfologici, ha perseguito lo scopo di valutare quali fattori abbiano presieduto al modellamento dei versanti di una valle alpina caratterizzata da un orientamento EW e da un profilo chiaramente asimmetrico (alta Valle di S. Pellegrino, Dolomiti).

Lo studio ha comportato, oltre ad indagini bibliografiche, osservazioni dettagliate sul terreno e sperimentazioni in laboratorio; infine, i risultati ottenuti in ciascuna fase sono stati posti a confronto. I dati ricavati sul terreno, uniti all'esito delle indagini bibliografiche, hanno fornito importanti indizi sulla omogeneità degli aspetti litologici e tettonici, mentre, al contempo, è venuta emergendo la variabilità del crioclastismo, provocata dalla diversa esposizione dei versanti (l'uno esposto a N, l'altro a S). D'altra parte le prove di laboratorio (caratterizzazione fisico-meccanica e gelifrazione sperimentale eseguite su campioni di roccia prelevati da entrambi i versanti della valle) hanno confermato l'omogeneità dei suddetti aspetti nella zona studiata. Pertanto si è potuto verosimilmente affermare che il modellamento asimmetrico della valle in esame è principalmente legato alla diversa esposizione dei versanti.

Viene, inoltre, presentata una rassegna bibliografica essenziale attinente a studi sul crioclastismo.

**SUMMARY** - *Study on the frost shattering phenomena of the upper Valle di S. Pellegrino (Dolomites): field research and laboratory experimentations*. *Il Quaternario*, 2, n.1, 1989, p. 79-98 The present paper illustrates a research carried out within the framework of a co-operation programme between the University of Caen (France) and the University of Modena, active in 1985-87 and concerning Geomorphology.

The research was made in order to value which factors determined the asymmetrical modelling of the slopes of a Dolomitic valley with an EW orientation (the upper Valle di S. Pellegrino). The study, besides a bibliographical research, involved detailed field observations and laboratory tests; finally field and laboratory data were compared. In particular, the influence of the factors lithology, tectonics and aspect on the evolution of the valley sides was examined.

The field observations (detailed geomorphological survey and observations on fracturation conditions of the rocks of the two slopes) showed, on the one hand, the differential morphology of the valley sides and the asymmetrical distribution of the Quaternary deposits, on the other hand, the constancy of structural conditions (attitude of strata, pattern of fissurations). The bibliographical and field data supplied important indications on the constancy of the factors lithology and tectonics, while, at the same time, emerged the variability of frost shattering, due to the different aspect of the slopes.

In the laboratories of the "Centre de Géomorphologie du CNRS" of Caen, determinations of physical and mechanical properties (water content, porosity, capillarity, permeability and microfissuration) of rock samples were carried out; besides experimental frost shattering was done by subjecting the above-mentioned samples to daily freeze-thaw cycles in cold rooms. From these tests data which confirmed the constancy of the factors lithology and tectonics were obtained.

Therefore it seems that the asymmetrical modelling of the valley sides has been deeply influenced by the factor aspect: the North-facing slope had been longer protected by glaciers (and by these more intensively shaped) from the effects of freeze-thaw cycles; besides longer lasting snow-coverings occurred after the retreat of the glaciers and occur at the present time on the North-facing slope, where should be ensured a protective action, which is different from the one of the opposite side. On the other hand, it seems that the different exposure when the snow-covering is absent everywhere, originates more remarkable frost shattering phenomena on the South-facing slope, because of a higher frequency of temperature fluctuations around 0°C.

A concise bibliographical review concerning frost shattering phenomena and mechanisms is also presented.

**Parole chiave:** "Porfidi", Valle di S. Pellegrino, crioclastismo, gelifrazione sperimentale  
**Key words:** "Porfidi", Valle di S. Pellegrino, frost shattering, experimental frost shattering

### 1. INTRODUZIONE

La presente nota documenta uno studio svolto nell'ambito di un programma di collaborazione, varato dalla CEE ed attivo nel biennio 1985-87, tra l'Università di Caen (Francia) e l'Università di Modena, segnatamente tra il Dipartimento di Geografia di Caen e l'Istituto di

Geologia di Modena. L'attività di ricerca nella città francese è stata effettuata prevalentemente presso il Centro di Geomorfologia del CNRS.

L'intento delle ricerche è stato quello di individuare i fattori che hanno principalmente influenzato il modellamento dei versanti di una valle alpina (alta Valle di S. Pellegrino, Dolomiti) caratterizzata da un orientamento

EW. Sono stati presi in considerazione, da un lato, i fattori litologia<sup>(1)</sup> e tettonica<sup>(2)</sup>, dall'altro il fattore esposizione. Venendo ad emergere, nel corso dello studio, che i primi verosimilmente hanno rappresentato e rappresentano tuttora delle costanti<sup>(3)</sup> nell'area in esame, sono state analizzate le modalità secondo cui il fattore esposizione potrebbe aver condizionato l'evoluzione dei fianchi vallivi.

Le ricerche sono state sviluppate, dopo un ampio studio bibliografico, sia sul terreno (rilevamento geomorfologico e raccolta di campioni di roccia) sia in laboratorio (caratterizzazione fisico-meccanica dei campioni e prove di gelifrazione sperimentale) ed i dati ottenuti sono stati posti a confronto (relazione terreno-laboratorio).

## 2. INDAGINI SUL TERRENO

### 2.1 Inquadramento geografico e geologico-strutturale

La Valle di S. Pellegrino è situata nelle Dolomiti occidentali; si estende per circa 11 km, con orientamento complessivamente EW, dal Passo di S. Pellegrino (1918 m) a Moena (1170 m).

Le indagini sul terreno sono state effettuate nella parte più alta della valle, che risulta compresa nella tavoletta "Passo di Valles" (F. 11 II SO) della Carta Topografica d'Italia (Fig. 1).

Il paesaggio è caratterizzato da scarpate subverticali, da aspri pendii privi di vegetazione, da versanti coperti di boschi e da zone prative e boschive, debolmente ondulate.

La Valle di S. Pellegrino è impostata su un'ampia anticlinale (Anticlinale di Cima Bocche), incisa dal Rio di S. Pellegrino.

L'erosione ha messo a nudo la successione stratigrafica dolomitica. Le formazioni affioranti sul versante settentrionale sono di età compresa tra il Permiano inf. ed il Ladinico; il versante meridionale invece è costituito unicamente da rocce del Permiano inf.

I depositi superficiali, che sono molto abbondanti, appaiono diversamente distribuiti sui due versanti, in seguito ad una diversa intensità dei processi morfogenetici di tipo glaciale, crionivale e torrentizio: depositi morenici con archi ben delineati e depositi di versante caratterizzati da ampi con e falde sono prevalenti sul fianco meridionale della valle, mentre i depositi torrentizi sono più

estesamente rappresentati sul fianco settentrionale, dove si individua una serie di ampie conoidi di deiezione.

I processi in atto consistono principalmente in fenomeni crioclastici e torrentizi.

Dal punto di vista bibliografico si sono rivelati particolarmente significativi, per le ricerche compiute sul terreno, gli elaborati cartografici e le note di Vardabasso (1930a; 1930b), Rossi (1962), Leonardi (1967), Ghezzi (1967), Sacerdoti (1967; 1969), Doglioni (1984) e Mantovani (1987a), per quanto riguarda gli aspetti geologici e petrografici; gli studi di Castiglioni B. (1926; 1930a; 1930b), Bianchi Castiglioni (1960), Castiglioni G.B. (1964) e Mantovani (1987b), relativamente alla geomorfologia.

### 2.2 Formazioni geologiche

Nell'area in esame e nelle zone immediatamente prospicienti è osservabile la seguente successione:

- 9) Calcarea della Marmolada (Ladinico)
- 8) Formazione di Livinallongo (Ladinico inf.)
- 7) Formazione di Contrin (Anisico sup.)
- 6) Calcari scuri di Morbiac (serie calcareo-siltosa) (Anisico inf.)
- 5) Conglomerato di Richthofen (Anisico inf.)
- 4) Formazione di Werfen (Trias inf.: Scitico)
- 3) Formazione a *Bellerophon* (Permiano sup.)
- 2) Arenarie di Val Gardena (Permiano medio)
- 1) Ignimbriti del "Complesso vulcanico atesino" (Permiano inf.)

Gli studi effettuati sul terreno ed in laboratorio sono stati soprattutto rivolti alle ignimbriti del "Complesso vulcanico atesino", che stanno alla base della successione stratigrafica; in considerazione di ciò nel presente paragrafo non verranno descritti i termini superiori (affioranti sul versante settentrionale della valle), anche se da questi sono stati prelevati campioni per analisi di laboratorio; di tali analisi vengono comunque riportati i risultati con lo scopo di fornire utili dati di raffronto.

#### 2.2.1 Ignimbriti del "Complesso vulcanico atesino"

Le ignimbriti presenti nell'area in oggetto appartengono all'unità superiore del "Complesso vulcanico atesino". In letteratura sono per lo più indicate come "porfidi quarziferi" o "porfidi"; per semplicità verrà di seguito utilizzato quest'ultimo termine.

I "porfidi" affiorano estesamente sul fianco meridionale della valle, del quale costituiscono l'unico litotipo presente, mentre sul fianco settentrionale formano una fascia con direzione EW, limitata verso N dai primi affioramenti delle Arenarie di Val Gardena.

All'interno della formazione sono state distinte diverse unità che, a seconda degli autori (Vardabasso, 1930b; Sacerdoti, 1967; 1969), prendono denominazioni diverse. In particolare, Sacerdoti (1969) distingue i "porfidi" del fianco settentrionale della valle in tre elementi

(1) Con tale termine si intendono le caratteristiche fisico-meccaniche di una data roccia, in quanto capaci di condizionarne la predisposizione alla gelifrazione.

(2) Con tale termine si intendono principalmente le conseguenze degli eventi tettonici a cui è stata sottoposta una data roccia e le condizioni attuali di giacitura.

(3) Con tale termine si vuole indicare l'omogeneità di determinati elementi nel territorio studiato e, quindi, l'influenza dei medesimi sull'evoluzione dei versanti.

principali:

- 3) Lave dacitiche
- 2) Ignimbriti riolitiche
- 1) Ignimbriti quarzolatitiche.

Per quanto riguarda il versante settentrionale, l'ele-

mento caratterizzante è l'imponente ammasso dacitico di Sasso dal Mus; esso taglia le ignimbriti quarzolatitiche con contatti prevalentemente verticali ed è a sua volta, ricoperto dalle ignimbriti riolitiche (Sacerdoti, 1969).

Il versante meridionale, relativamente all'area rap-

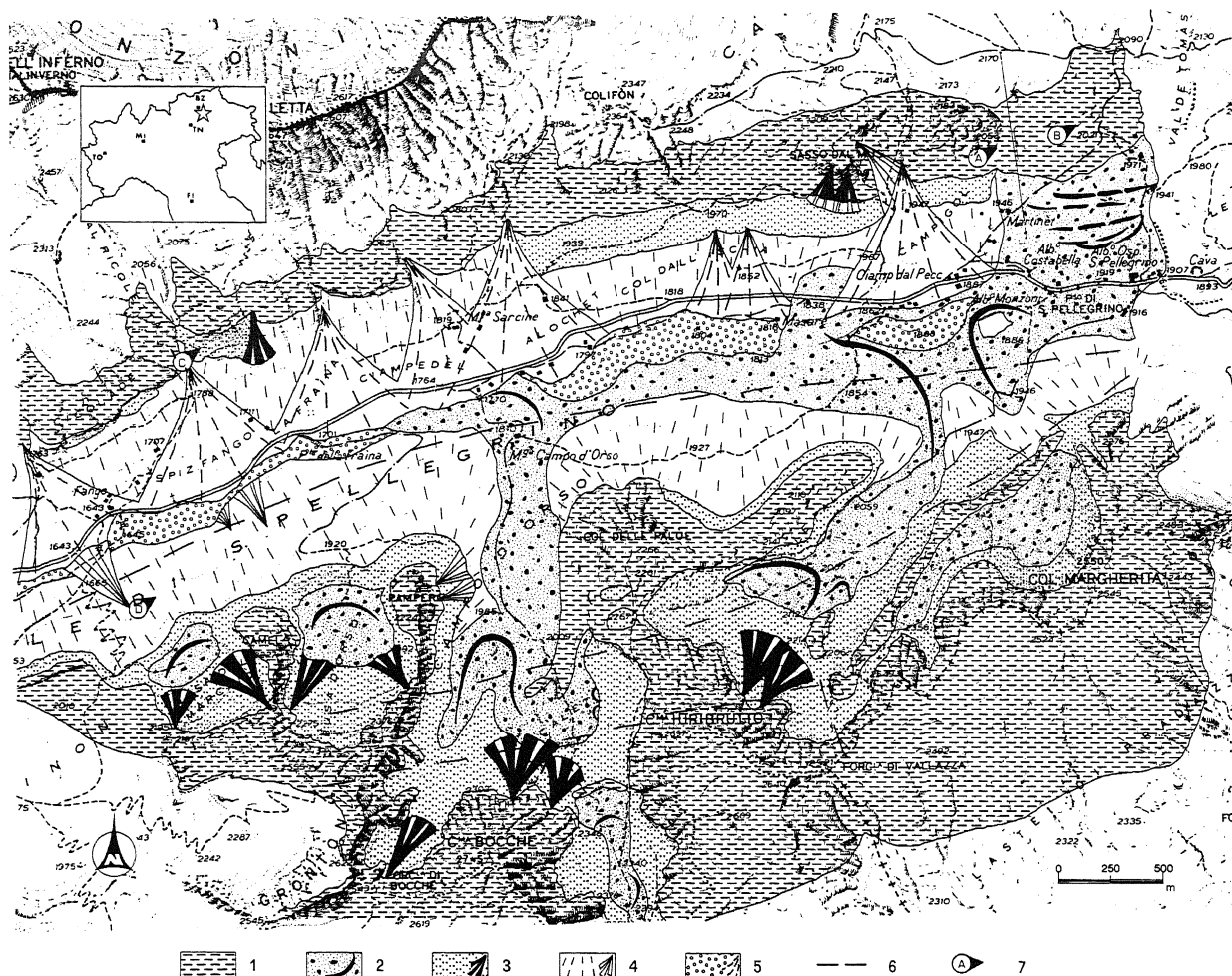


Fig. 1 - Carta geomorfologica schematica dell'alta Valle di S. Pellegrino (Dolomiti). Legenda: 1) "porfidi"; 2) depositi glaciali ed archi morenici; 3) falde di detrito e coni; 4) depositi accumulati per gravità e ruscellamento e relativi coni; 5) depositi alluvionali e conoidi di deiezione; 6) faglia; 7) sito di campionamento.

*Geomorphological schematic map of the upper Valle di S. Pellegrino (Dolomites). Legend: 1) "porfidi"; 2) glacial deposits and morainic ridges; 3) scree slopes and talus cones; 4) deposits and cones due to gravity and running waters; 5) stream deposits and alluvial fans; 6) fault; 7) rock sampling site.*

presentata in Fig. 1, è costituito, per la maggior parte, da ignimbriti riodacitiche, oltre alle ignimbriti quarzolatitiche (Sacerdoti, 1969), della porzione più occidentale; inoltre, secondo Vardabasso (1930b), tufi varicolori affiorerebbero sul Col delle Palue.

La distinzione delle varie unità è difficilmente effettuabile sul terreno e deve essere assistita da un'analisi petrografica. Nel caso in esame, sono state confrontate le carte geologiche esistenti, al fine di scegliere affioramenti opportuni per la campionatura. I campioni di "porfido" sono stati suddivisi in 4 gruppi (A, B, C, D) dalle

caratteristiche petrografiche diverse e prelevati sui due versanti.

Gli ammassi rocciosi appaiono generalmente interessati da due sistemi di fessurazione pressochè perpendicolari: l'uno subverticale, l'altro suborizzontale. Le discontinuità presenti, risultando vie d'accesso preferenziali per l'acqua, appaiono di fondamentale importanza per l'azione del crioclastismo.

In base ad osservazioni qualitative di dettaglio compiute su entrambi i versanti, si può affermare che l'andamento delle fessurazioni (orientazione, ampiezza

delle maglie della fessurazione medesima, ecc.) presenti caratteristiche costanti; il diverso modellamento dei fianchi vallivi non sembrerebbe, dunque, in prima istanza, riconducibile a cause legate ad una diversa distribuzione delle discontinuità.

### 2.3 Formazioni superficiali

L'area è abbondantemente ricoperta da depositi quaternari poligenetici e policronologici di spessore vario, tanto che il substrato geologico affiora quasi esclusivamente in corrispondenza di ripide pareti, incisioni torrentizie e decorticazioni dei versanti (Fig. 1).

Depositi morenici sono individuabili in prossimità del Passo di S. Pellegrino: essi costituiscono un lembo relictito dell'ampia coltre lasciata dal ghiacciaio wurmiano, che occupava tutta la valle e che transfluiva nella Valle del Biois, spinto dal ghiacciaio dell'Avisio.

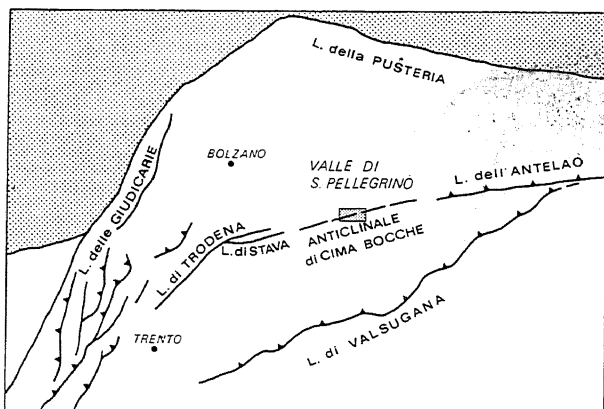


Fig. 2 - Schema tettonico mostrante la collocazione dell'allineamento triassico Linea di Stava-Anticlinaline di Cima Bocche nell'ambito dei più importanti lineamenti strutturali alpini circostanti (da Doglioni, 1984; modif.).

*Tectonic setting showing the position of the Triassic Stava Line-Cima Bocche Anticline alignment with respect to the most important alpine surrounding structures (from Doglioni, 1984; modif.).*

Sul versante meridionale della valle, ad alte quote, sono invece diffusi depositi morenici stadiali, lasciati da lingue di ghiacciai locali, che si trovavano entro le numerose conche presenti sul lato settentrionale della Catena di Bocche. Sul versante settentrionale della valle, per quanto attiene all'area in esame, non sono presenti depositi morenici, se non nella porzione più orientale.

I depositi di versante derivano, quasi esclusivamente, dal frazionamento delle rocce causato dai cicli di gelo e disgelo. Alle quote più alte, ove sono molto sviluppati, appaiono in alimentazione attiva; a quote più basse, dove la gelifrazione è meno intensa, tende ad instaurarsi una vegetazione di tipo pionieristico. Su entrambi i versanti si osservano inoltre ampie fasce di detrito che si estendono verso l'alto più o meno fino all'isoipsa dei 2000 m.

I depositi alluvionali e torrentizi sono legati all'azio-

ne di trasporto tanto del Rio di S. Pellegrino, quanto dei torrenti che scorrono nei toal (canaloni profondamente incisi) del versante settentrionale. Questi ultimi hanno alimentato ampi con di deiezione, che si presentano debolmente inclinati e per lo più ricoperti da vegetazione prativa.

Localmente si rinvengono lembi di depositi palustri di dimensioni molto limitate.

### 2.4 Lineamenti tettonici

L'elemento tettonico che principalmente interessa la Valle di S. Pellegrino è l'Anticlinaline di Cima Bocche, di cui i "porfidi" costituiscono il nucleo; essa si raccorda con la Sinclinale del Travignolo posta più a S, nell'ambito di un motivo tettonico regionale di anticlinali e sinclinali; fa parte, inoltre, di un'importante struttura triassica delle Dolomiti centrali, l'"allineamento Linea di Stava-Anticlinaline di Cima Bocche" (Doglioni, 1984), che presenta una direzione di circa N70E (Fig. 2).

L'asse dell'Anticlinaline di Cima Bocche è orientato secondo una direzione molto vicina a quella EW e passa poco a N della cresta orografica della catena di Bocche: è individuabile tra la cresta suddetta ed il Rio di S. Pellegrino.

Le rocce di entrambi i versanti presentano una giacitura a reggipoggio con inclinazione intorno ai 20°.

La struttura in esame è interessata, inoltre, da una serie di faglie inverse subverticali pressochè parallele alla valle (Doglioni, 1984). Di minore entità risultano le dislocazioni perpendicolari all'asse vallivo (Sacerdoti, 1969).

L'omogeneità di condizioni strutturali e giaciture sui due versanti della valle, confermata dalle osservazioni compiute sul terreno, fa ritenere che il fattore tettonico sia da considerarsi una costante; tale ipotesi dovrà essere confermata tramite prove di laboratorio atte a rilevare la densità di microfessurazioni dei campioni di roccia.

### 2.5 Forme del paesaggio

L'attuarsi, in periodi diversi, di processi differenziati ha determinato un paesaggio molto vario; in particolare risultano evidenti la diversa acclività ed il diverso grado di modellamento dei versanti.

L'uniformità della litologia e la semplicità della struttura tettonica non hanno indotto molte forme strutturali vere e proprie. Ad esempio, i due ripiani sul fianco meridionale della valle, l'uno ai piedi del Col Margherita, l'altro presso Le Palue, potrebbero essere messi in relazione con fenomeni tettonici, che avrebbero portato allo sdoppiamento di un'unica originaria superficie; non va però trascurata l'importanza dell'azione dei ghiacciai nel loro modellamento. Secondo Vardabasso (1930b), tali ripiani sarebbero invece correlabili alla presenza dei suddetti tufi varicolori, meno resistenti all'erosione delle altre unità ignimbriche.

Le forme glaciali appaiono ben sviluppate; i depositi

morenici sono spesso caratterizzati da archi di varie dimensioni e per lo più in buono stato di conservazione. Nella Catena di Bocche sono presenti anche numerosi circhi glaciali, orientati prevalentemente verso NNW e generalmente ben conservati.

Successivamente al ritiro dei ghiacciai, i versanti sono stati rimodellati da processi periglaciali, principalmente di tipo crioclastico, soprattutto alle alte quote; alle medie e basse quote, i versanti medesimi si manifestano per lo più vegetati, anche se localmente interessati da fenomeni erosivi di varia natura.

Dal punto di vista idrografico il Rio di S. Pellegrino costituisce l'elemento principale di drenaggio delle acque provenienti da entrambi i versanti della valle. I profili degli affluenti di destra e di sinistra appaiono notevolmente differenziati. I primi, infatti, hanno inciso nella roccia profonde vallecicole a V e formato in prossimità del fondovalle ampie conoidi di deiezione, responsabili, talora, della deviazione del corso d'acqua principale. I secondi si manifestano molto meno incisi, ma con portate più continue in relazione ad una più lenta fusione della neve.

## 2.6 Considerazioni relative alle indagini sul terreno

Le osservazioni di dettaglio sul terreno, affiancate dallo studio bibliografico, portano ad ipotizzare che il modellamento dell'alta Valle di S. Pellegrino sia stato e sia ancora principalmente condizionato dalla diversa esposizione dei versanti. Questa avrebbe provocato un'ineguale permanenza dei ghiacciai ed un'azione differenziata del crioclastismo dopo il ritiro dei ghiacciai medesimi.

Le indagini di laboratorio hanno avuto lo scopo di accertare se anche il fattore litologia, così come il fattore tettonica, possa essere considerato una costante, relativamente alle diverse varietà petrografiche individuate nell'ambito dei "porfidi".

## 3. RASSEGNA BIBLIOGRAFICA SUL CRIOCLASTISMO

Naturalmente lo studio degli effetti del crioclastismo è fondamentale per la comprensione di molti fenomeni periglaciali; in effetti, il frazionamento delle rocce in regioni fredde è per lo più attribuibile a questo processo.

Ultimamente, soprattutto nei paesi nordici ed in Francia, si è sviluppato un crescente interesse per gli effetti geomorfologici legati a condizioni periglaciali. Numerosi ricercatori hanno tentato di interpretare i meccanismi dei processi crioclastici ed individuare i parametri che, volta per volta, entrano in gioco, cercando di riprodurre in laboratorio le condizioni a cui le rocce sono sottoposte in natura ed effettuando, al contempo, osservazioni e rilievi sul terreno.

Viene qui brevemente presentata una rassegna bi-

bliografica essenziale relativa a tali problematiche, che vengono più ampiamente trattate in una precedente nota dello scrivente (Soldati, 1988).

Risultano utili per un inquadramento metodologico generale gli studi di Russell (1943), Tröll (1944), Peltier (1950), Fraser (1959), Büdel (1963), Brochu (1964), Tricart & Cailleux (1965), Birot (1968) e Washburn (1979).

Appaiono d'altra parte fondamentali, relativamente alle modalità di osservazione sul terreno, le ricerche di Battle & Lewis (1951), Battle (1960), Gardner (1969), Hall (1975), Thorn (1979), McGreevy (1982) e Francou (1982; 1983).

Per una corretta interpretazione dell'intensità dei processi crioclastici, riveste una notevole importanza la valutazione dell'influenza dell'esposizione dei versanti sulle variazioni di temperatura e la conoscenza delle relazioni tra temperatura dell'aria e della roccia (Geiger, 1965; Mathys, 1974; Pancza, 1979; McGreevy, 1982; Francou, 1988a).

Sperimentazioni geomorfologiche volte all'individuazione dei fattori che influenzano la gelificazione sono state effettuate sin dalla fine del secolo scorso (Högbom, 1899; Tricart, 1956; Wiman, 1963; Martini, 1967; Potts, 1970; Keeble, 1971; Brockie, 1972).

Studi significativi di gelificazione sperimentale sono stati inoltre eseguiti negli ultimi anni presso il Centro di Geomorfologia del CNRS di Caen (Lautridou, 1971; 1976; Lautridou et al., 1977; Lautridou ed Ozouf, 1978; Leta-vernier, 1980; McGreevy, 1981; Ozouf, 1983; Leta-vernier, 1984; Lautridou, 1985; Francou, 1988b).

Infine, per un'adeguata comprensione del ruolo del crioclastismo nell'evoluzione di determinate forme del rilievo, appare chiara la necessità di conoscere anche dal punto di vista fisico-meccanico i meccanismi che regolano tale processo (Thomson, 1862; Ansted, 1871; Bridgman, 1912; Lozinski, 1912; Taber, 1929; 1930; Grawe, 1936; Powers, 1945; Taber, 1950; Battle, 1960; Rapp, 1960; Everett, 1961; Dunn & Hudec, 1966; Ollier, 1969; Evans, 1970; Mellor, 1970; Connell & Tombs, 1971; Birkeland, 1974; Lautridou, 1971; 1976; Konischev, 1978; Whalley et al., 1982; Fukuda, 1983; Hallet, 1983; Walder & Hallet, 1986).

Gli autori generalmente concordano nell'affermare che il crioclastismo è essenzialmente regolato da tre variabili fondamentali: tipo di roccia, temperatura ed umidità. Pertanto, a parità di condizioni esterne, il grado di gelività e la natura dei processi dipendono dalle proprietà fisiche e chimiche della roccia (dimensione e distribuzione dei pori, permeabilità, locazione e percentuale di minerali argillosi, ecc.).

Lo studio di queste ultime può essere compiuto in modo soddisfacente tramite esami di laboratorio, mentre appare spesso difficile ricavare sul terreno dati attendibili di temperatura e, soprattutto, di umidità per l'estrema variabilità, sia temporale che spaziale, di tali parametri.

#### 4. ESPERIENZE DI LABORATORIO: CARATTERIZZAZIONE FISICO-MECCANICA DEI CAMPIONI DI ROCCIA

##### 4.1 Metodologie e tecniche utilizzate

###### 4.1.1 Campionamento delle rocce

Nei laboratori del Centro di Geomorfologia di Caen sono state determinate alcune caratteristiche fisico-meccaniche (contenuto d'acqua, porosità, permeabilità, microfessurazione) dei campioni di roccia prelevati nell'alta Valle di S. Pellegrino.

Tale determinazione, che viene solitamente effettuata prima di sottoporre i campioni alla gelifrazione sperimentale, permette, in generale, di valutare la loro predisposizione alla gelifrazione medesima e, nel caso particolare dei calcari, consente verosimilmente di individuare il grado di gelività, con riferimento ad una "scala" costruita sperimentalmente da Letavernier (1984).

Tabella 1 – Caratterizzazione litologica dei campioni della 1a serie e della 2a serie

*Lithological characterisation of the 1st series and 2nd series samples*

1a SERIE	LITOTIPO	2a SERIE
Campione		Campione
1	"Porfido"	1
2	Calcarea della F.a Bellerophon ("facies cavernosa")	2a
-	Gesso della F.a Bellerophon	2A
3	Calcarea della F.a Bellerophon ("facies massiva")	3
4a;4b	Arenaria di Val Gardena ("facies fine")	4
4A	Arenaria di Val Gardena ("facies grossolana")	4A
5a	Calcarea della F. di Werfen	5a
5b	Calcarea della F. di Werfen ("facies fossilifera")	-
6	Calcarea della Marmolada	6

Nel caso in oggetto, i campioni di roccia sono stati suddivisi in tre serie, sia per motivi tecnici, sia in relazione agli scopi della ricerca. La 1a e la 2a serie sono costituite da vari litotipi della successione dolomitica (Tab. 1). Il campionamento di rocce diverse dai "porfidi" è stato effettuato con l'intento di confrontare dati sperimentali presumibilmente diversificati, per trarre, da tale comparazione, utili elementi sulle modalità interpretative dei risultati. La 3a serie è costituita, invece, unicamente da "porfidi" ed è stata suddivisa in quattro gruppi (A, B, C, D), a seconda delle caratteristiche petrografiche ed in base all'ubicazione dei campioni raccolti (Tab. 2; Fig. 1). Sull'interpretazione dei risultati di quest'ultima serie si basa la relazione "terreno-laboratorio".

I metodi ed i parametri considerati in questo lavoro sono in armonia con le proposte de *La Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur*

*les matériaux* (RILEM) (1980) e del Centro di Geomorfologia del CNRS di Caen (Lautridou & Ozouf, 1980a; 1980b; 1982).

Tabella 2 – Caratterizzazione litologica dei campioni della 3a serie

*Lithological characterisation of the 3rd series sample*

3a SERIE	LITOTIPO
Campioni	(secondo Sacerdoti, 1969)
da 1 a 5 (A)	Daciti
da 6 a 10 (B)	Ignimbritti riolitiche
da 11 a 15 (C)	Ignimbritti quarzolattiche
da 16 a 21 (D)	Ignimbritti quarzolattiche

###### 4.1.2 Misure preliminari

Preliminarmente, sono state effettuate le misure di due grandezze indice, peso secco e volume totale, necessarie per ricavare gli altri parametri.

Il peso secco ( $W_d$ ) dei campioni è stato misurato dopo essiccamento in armadio termostatico alla temperatura di 45°C. Un campione veniva considerato "secco" quando le variazioni di peso, fra due determinazioni successive, a 24 ore di distanza, erano inferiori a 1/1000 del peso del campione stesso. Per i diversi litotipi sono stati necessari tempi variabili da 7 a 15 giorni.

Il volume totale (V) è stato ricavato utilizzando il principio della "spinta di Archimede", immergendo i campioni, appesi ad un filo ed imbibiti d'acqua, in un recipiente contenente acqua e riposto su una bilancia tarata (Tabb. 3, 4, 5).

Tabella 3 – Contenuto d'acqua dei campioni della 1ª serie

Legenda: V = volume;  $W_d$  = peso secco;  $W_{sat}$  = peso umido per immersione semplice;  $N_w$  = contenuto d'acqua per immersione semplice;  $W'_{sat}$  = peso umido per immersione sotto vuoto;  $N_l$  = contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto;  $W''_{sat}$  = peso umido per immersione sotto pressione;  $N'_l$  = contenuto d'acqua per immersione sotto pressione; H = coefficiente di saturazione  
*Water content of the 1st series samples. Legend: V = volume;  $W_d$  = dry weight;  $W_{sat}$  = humid weight after simple immersion;  $N_w$  = water content after simple immersion;  $W'_{sat}$  = humid weight after under vacuum immersion;  $N_l$  = water content after under vacuum immersion;  $W''_{sat}$  = humid weight after under pressure immersion;  $N'_l$  = water content after under pressure immersion; H = saturation coefficient*

Campione	V (cm <sup>3</sup> )	$W_d$ (g)	$W_{sat}$ (g)	$N_w$ (%)	$W'_{sat}$ (g)	$N_l$ (%)	$W''_{sat}$ (g)	$N'_l$ (%)	H (%)
1	471,0	1180,5	-	-	1211,8	6,64	-	-	-
2	285,5	648,0	-	-	702,9	19,22	-	-	-
3	526,0	1419,0	-	-	1438,5	3,7	-	-	-
4a	297,5	759,3	-	-	776,8	5,88	-	-	-
4b	82,0	207,9	-	-	213,5	8,04	-	-	-
4A	349,0	874,2	-	-	894,8	5,9	-	-	-
5a	298,0	757,9	-	-	789,6	10,63	-	-	-
5b	174,5	471,0	-	-	473,4	1,37	-	-	-
6	388,5	1072,5	-	-	1083,5	2,83	-	-	-

#### 4.1.3 Contenuto d'acqua per immersione semplice di 48 ore<sup>(4)</sup>

*Modalità operative:* i campioni "secchi" sono stati posti in un recipiente contenente acqua:

- fino ad 1/4 della loro altezza, per 1 h
- fino ad 1/2 della loro altezza, per 23 h
- totalmente, per 24 h.

Dopo 48 ore di immersione, si è misurato il peso saturo o umido ( $W_{sat}$ ) dei campioni, il cui valore evidenzia la quantità d'acqua assorbita.

*Espressione dei risultati:* il contenuto d'acqua per immersione semplice di 48 ore è dato da:

$$N_w = \frac{W_{sat} - W_d}{V}$$

dove:

$W_{sat}$  = peso del campione saturato d'acqua per immersione semplice di 48 ore

$W_d$  = peso secco del campione

$V$  = volume totale del campione.

Tabella 4 – Contenuto d'acqua dei campioni della 2ª serie

Legenda:  $V$  = volume;  $W_d$  = peso secco;  $W_{sat}$  = peso umido per immersione semplice;  $N_w$  = contenuto d'acqua per immersione semplice;  $W'_{sat}$  = peso umido per immersione sotto vuoto;  $N'_t$  = contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto;  $W''_{sat}$  = peso umido per immersione sotto pressione;  $N''_t$  = contenuto d'acqua per immersione sotto pressione;  $H$  = coefficiente di saturazione; (1) causa dissoluzione  $V = 480,0$ ;  $W_d = 1002,2$ ; (2) causa dissoluzione  $V = 477,5$ ;  $W_d = 995,5$

*Water content of the 2nd series samples*

Legend:  $V$  = volume;  $W_d$  = dry weight;  $W_{sat}$  = humid weight after simple immersion;  $N_w$  = water content after simple immersion;  $W'_{sat}$  = humid weight after under vacuum immersion;  $N'_t$  = water content after under vacuum immersion;  $W''_{sat}$  = humid weight after under pressure immersion;  $N''_t$  = water content after under pressure immersion;  $H$  = saturation coefficient; (1) because of dissolution  $V = 480,0$ ;  $W_d = 1002,2$ ; (2) because of dissolution  $V = 477,5$ ;  $W_d = 995,5$

Campione	V (cm <sup>3</sup> )	W <sub>d</sub> (g)	W <sub>sat</sub> (g)	N <sub>w</sub> (%)	W' <sub>sat</sub> (g)	N' <sub>t</sub> (%)	W'' <sub>sat</sub> (g)	N'' <sub>t</sub> (%)	H (%)
1	469,0	1208,5	1223,5	3,19	1228,2	4,20	1228,2	4,20	75,95
2a	391,0	886,2	908,6	5,72	925,0	9,92	938,0	13,24	40,68
2A	488,0	1014,0	1041,0	5,53	1053,0	10,58 <sup>(1)</sup>	1046,0	10,57 <sup>(2)</sup>	50,45
3	164,8	436,9	444,7	4,73	445,2	5,03	445,2	5,06	94,03
4	105,0	268,1	274,0	5,61	273,0	4,76	273,0	4,76	84,84
4A	341,0	853,9	868,4	4,25	873,5	5,74	873,6	5,77	73,65
5a	316,0	849,0	855,2	1,96	858,5	3,00	858,8	3,10	63,22
6	238,5	645,4	650,0	1,92	650,3	2,05	650,3	2,05	93,65

Per i campioni della 1a serie non sono stati determinati né i valori del contenuto d'acqua per immersione semplice, né quelli del contenuto d'acqua per immersione

sotto pressione, al fine di sottoporre i campioni ad un maggior numero di cicli di gelo e disgelo (Tabb. 3, 4, 5).

Tabella 5 – Contenuto d'acqua dei campioni della 3ª serie

Legenda:  $V$  = volume;  $W_d$  = peso secco;  $W_{sat}$  = peso umido per immersione semplice;  $N_w$  = contenuto d'acqua per immersione semplice;  $W'_{sat}$  = peso umido per immersione sotto vuoto;  $N'_t$  = contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto;  $W''_{sat}$  = peso umido per immersione sotto pressione;  $N''_t$  = contenuto d'acqua per immersione sotto pressione;  $H$  = coefficiente di saturazione  
*Water content of the 3rd series samples*

Legend:  $V$  = volume;  $W_d$  = dry weight;  $W_{sat}$  = humid weight after simple immersion;  $N_w$  = water content after simple immersion;  $W'_{sat}$  = humid weight after under vacuum immersion;  $N'_t$  = water content after under vacuum immersion;  $W''_{sat}$  = humid weight after under pressure immersion;  $N''_t$  = water content after under pressure immersion;  $H$  = saturation coefficient

Campione	V (cm <sup>3</sup> )	W <sub>d</sub> (g)	W <sub>sat</sub> (g)	N <sub>w</sub> (%)	W' <sub>sat</sub> (g)	N' <sub>t</sub> (%)	W'' <sub>sat</sub> (g)	N'' <sub>t</sub> (%)	H (%)	
gruppo A	1	468,5	1223,7	1234,8	2,4	1237,1	2,8	1236,9	2,8	85,7
	2	328,5	859,0	866,8	2,4	869,0	3,0	869,6	3,2	75,0
	3	327,5	870,7	875,5	1,5	876,0	1,6	876,5	1,8	83,3
	4	307,5	808,0	815,7	2,5	819,1	3,6	819,1	3,6	69,4
	5	259,0	653,2	665,1	4,6	669,4	6,2	670,2	6,6	69,7
gruppo B	6	265,0	691,5	694,7	1,2	695,7	1,6	696,0	1,7	70,6
	7	380,0	979,0	986,1	1,9	990,5	3,0	990,9	3,1	61,3
	8	247,5	645,5	649,4	1,6	650,6	2,1	651,0	2,2	72,7
	9	303,0	781,9	788,9	2,3	790,7	2,9	791,0	3,0	76,6
	10	468,0	1213,0	1222,6	2,0	1225,3	2,6	1225,1	2,6	76,9
gruppo C	11	246,5	666,4	668,0	0,6	668,3	0,8	668,5	0,8	75,0
	12	294,0	801,0	802,0	0,3	802,2	0,4	802,5	0,5	60,0
	13	287,5	779,0	780,6	0,6	781,0	0,7	781,1	0,7	85,7
	14	310,0	843,8	844,8	0,3	844,8	0,3	844,9	0,3	100,0
	15	185,5	505,6	507,0	0,7	507,6	1,1	507,6	1,1	63,6
gruppo D	16	239,0	596,6	611,6	6,3	613,8	7,2	613,7	7,2	87,5
	17	303,5	759,8	775,4	5,1	777,5	5,8	778,4	6,1	83,6
	18	229,0	573,0	583,7	4,7	586,5	5,9	586,5	5,9	79,6
	19	314,5	819,4	827,7	2,6	828,9	3,0	829,4	3,2	81,2
	20	214,0	572,1	575,3	1,5	575,9	1,8	575,8	1,8	83,3
	21	246,0	639,9	646,2	2,6	647,3	3,0	647,7	3,2	81,2

#### 4.1.4 Contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto di 24 ore<sup>(5)</sup>

*Modalità operative:* dopo essere stati di nuovo essiccati, i campioni venivano introdotti in una campana di pyrex, per eliminare, creando il vuoto con una pompa, l'umidità e l'aria contenuta nei pori (il vuoto, di solito, non è completo: la pressione residuale è di 3-4 mm di Hg); tale operazione dura, normalmente, circa 30 minuti. Tramite un'altra pompa, durante un periodo di qualche ora, si è poi immessa acqua degassificata all'interno della campana. Il vuoto è stato così eliminato ed i campioni sono stati lasciati in immersione totale per 24 ore alla pressione atmosferica e, in seguito, pesati. La creazione di un vuoto e la degassificazione vengono eseguite per ottenere un migliore assorbimento d'acqua da parte dei campioni.

*Espressione dei risultati:* il contenuto d'acqua ricavato

<sup>(4)</sup> *Teneur en eau* secondo la terminologia adottata dal Centro di Geomorfologia del CNRS di Caen.

<sup>(5)</sup> *Porosité* secondo la terminologia adottata dal Centro di Geomorfologia del CNRS di Caen.

sotto vuoto, assimilabile alla porosità per campioni di dimensioni limitate (Bousquié, 1979), è uguale a:

$$N_t = \frac{W'_{\text{sat}} - W_d}{V}$$

dove:

$W'_{\text{sat}}$  = peso del campione saturato d'acqua sotto vuoto

$W_d$  = peso secco del campione

$V$  = volume totale del campione.

(Tabb. 3, 4, 5).

#### 4.1.5 Contenuto d'acqua per immersione sotto pressione di 24 ore<sup>(6)</sup>

*Modalità operative:* tramite un banco di messa sotto pressione, i campioni, immersi in acqua degassificata, sono stati sottoposti a pressioni crescenti fino a 100 bar.

La prova viene sempre effettuata su campioni già saturati sotto vuoto ed ha una durata di 24 ore. Al termine della prova i campioni sono stati pesati.

*Espressione dei risultati:* la porosità accessibile all'acqua sotto pressione è uguale a:

$$N'_t = \frac{W''_{\text{sat}} - W_d}{V}$$

dove:

$W''_{\text{sat}}$  = peso del campione saturato d'acqua sotto pressione

$W_d$  = peso secco del campione

$V$  = volume totale del campione.

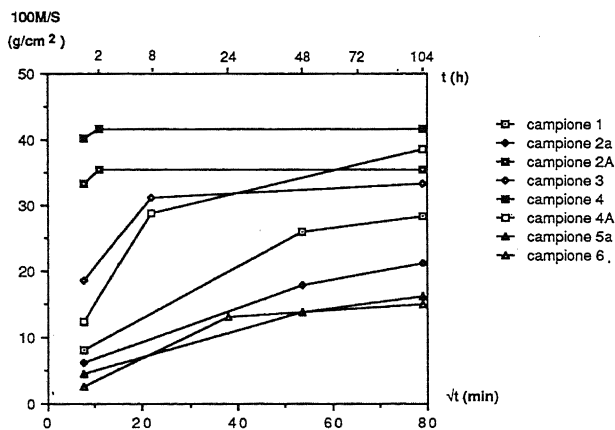


Fig. 3 - Curve ponderali di risalita capillare relative ai campioni della 2a serie.  
*Ponderal curves of capillary rise with regard to the samples of the 2nd series*

(6) Porosità totale secondo la terminologia del Centro di Geomorfologia del CNRS di Caen.

La saturazione ottenuta è assimilabile alla porosità totale accessibile all'acqua.

I valori ricavati dalla prova testè descritta dovrebbero essere, in teoria, leggermente superiori a quelli della prova effettuata sotto vuoto, in seguito ad una maggiore possibilità di penetrazione d'acqua nei pori; se i valori fossero simili, significherebbe che la prova sotto vuoto ha fornito effettivamente dei valori uguali a quelli della porosità totale e che la prova sotto pressione ne è stata una conferma; qualora i valori dell'ultima prova risultassero inferiori, sarebbe dimostrato che la porosità del campione in esame è essenzialmente dovuta alla fessurazione e che la pressione esercitata ha chiuso le discontinuità, diminuendo, in tal modo, la porosità medesima.

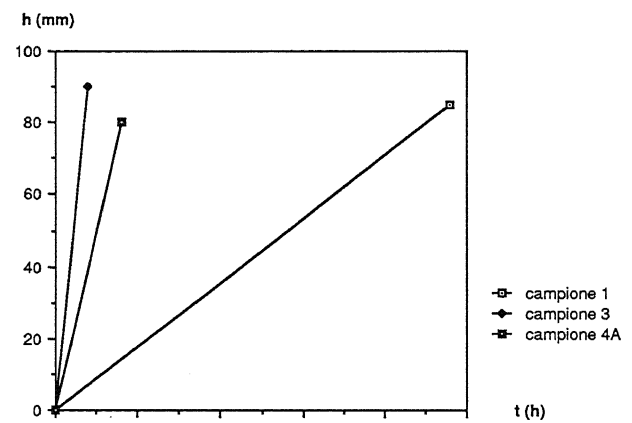


Fig. 4 - Curve dell'altezza di risalita capillare relative ai campioni 1, 3, 4A (2a serie).  
*Curves of capillary rise height with regard to the samples 1, 3, 4A (2nd series).*

#### 4.1.6 Coefficiente di saturazione

Il coefficiente di saturazione (H), altrimenti detto coefficiente di Hirschwald, è dato dal rapporto:

$$H = \frac{N_w}{N_t \text{ (o } N'_t)} \cdot 100$$

dove:

$N_w$  = contenuto d'acqua per immersione semplice di 48 ore

$N_t$  = contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto

$N'_t$  = contenuto d'acqua per immersione sotto pressione.

Tra le grandezze  $N_t$  e  $N'_t$ , generalmente, viene scelta quella che ha il valore più alto, poiché è quella che meglio rappresenta la "porosità totale".

Nel caso in esame, il problema non si è posto per quanto riguarda la 2a serie, dato che i valori di  $N_t$  e  $N'_t$  coincidevano; per la 3a serie, invece, sono stati scelti i valori di  $N'_t$  (Tabb. 3, 4, 5).



#### 4.1.7 Assorbimento d'acqua per risalita capillare

*Dispositivo sperimentale:* l'apparecchiatura è costituita da:

- un recipiente a fondo piatto;
- un sistema idraulico che permetta di mantenere un livello costante d'acqua all'interno del recipiente;
- una serie di bacchette triangolari, poste sul fondo del recipiente, sulle quali vengono posti i campioni (preferibilmente a forma di parallelepipedo);
- una copertura in plexiglass amovibile, tale da ridurre al minimo l'evaporazione e che, essendo appoggiata alle bacchette ed immersa per qualche mm nell'acqua, isola i campioni dall'esterno (all'interno, l'umidità relativa può raggiungere il 90%).

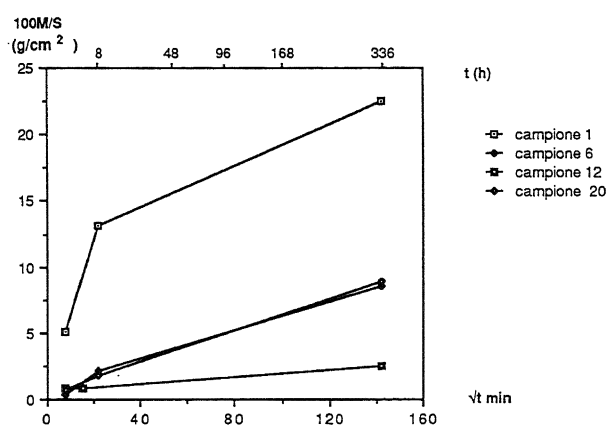


Fig. 5 - Curve ponderali di risalita capillare relative ai campioni della 3a serie.  
*Ponderal curves of capillary rise with regard to the samples of the 3rd series.*

Nel caso in esame è stata utilizzata acqua distillata. *Modalità operativa:* i campioni sono stati appoggiati sulle bacchette ed il livello dell'acqua è stato tenuto ad una altezza costante, tale che questi fossero immersi per 2+3 mm della loro altezza. Ad intervalli di tempo prestabiliti, gli stessi sono stati pesati e si è rilevata l'altezza della

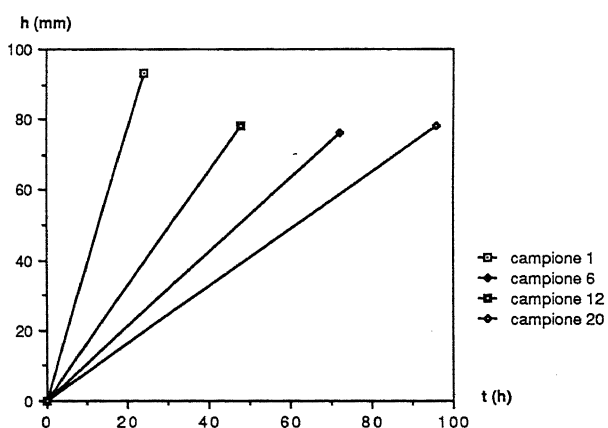


Fig. 6 - Curve dell'altezza di risalita capillare relative ai campioni della 3a serie.  
*Curves of capillary rise height with regard to the samples of the 3rd series).*

frangia capillare. I dati sono stati riportati in appositi grafici e tabelle (Figg. 3, 4, 5, 6; Tabb. 6, 7).

La lenta risalita dell'acqua permette un allontanamento completo dell'aria.

Si ritiene terminata la prova quando due pesate successive danno lo stesso valore.

*Espressione dei risultati:* oltre alla rilevazione delle macrofessure che si impregnano rapidamente d'acqua, e di una eventuale eterogeneità, evidenziata da una risalita capillare differenziata, assume notevole importanza la costruzione di due curve caratteristiche per ciascun campione:

- la prima (Figg. 3, 5), detta "curva ponderale di risalita capillare", mette in relazione la radice quadrata del tempo di risalita (in ascisse) con l'aumento di peso per unità di superficie a contatto con l'acqua (in ordinate), rappresentato dal rapporto 100M/S dove:

$M$  = massa totale d'acqua assorbita dall'inizio della prova

$S$  = area di base del campione.

La curva è generalmente costituita da due tratti: il primo è assimilabile ad una retta con inclinazione variabile a seconda dell'entità della risalita capillare; il secondo, ad andamento suborizzontale, non è più rappresentativo di un assorbimento d'acqua per capillarità, ma di una progressiva, lenta saturazione dovuta alla dissoluzione di "bolle d'aria" (Bousquié, 1979); la seconda (Figg. 4, 6), detta "curva dell'altezza di risalita capillare", esprime l'altezza di risalita della frangia capillare in funzione del tempo. Essa presenta, generalmente, un solo tratto rettilineo con inclinazione direttamente proporzionale alla velocità di risalita, limitato verso l'alto dall'altezza del campione.

#### 4.1.8 Velocità longitudinale di propagazione di onde ultrasoniche

*Principio del metodo:* la prova consiste nel misurare il tempo impiegato da una vibrazione meccanico-elastica per attraversare un campione: la velocità longitudinale di propagazione delle onde dipende dalla densità e dalla rigidità, oltre che dalla natura mineralogica, del litotipo in esame.

Lo scopo delle misure è di determinare il grado di omogeneità di un materiale e di distinguere la porosità dovuta a fessurazione ( $N_f$ ) da quella dovuta a pori ( $N_p$ ).

*Dispositivo sperimentale:* una trasmittente piezoelettrica, posta ad una estremità del campione, emette un treno d'onde sotto l'impulso di un generatore elettrico. All'altra estremità del campione, una ricevente trasforma il treno d'onde in arrivo in un segnale elettrico visualizzabile sullo schermo di un oscilloscopio, o tramite un contatore elettronico; è così possibile eseguire una lettura diretta del tempo di percorso dell'onda in microsecondi.

La velocità ( $v_l$ ) sarà data dal rapporto  $l/t$ , dove:

$l$  = lunghezza del campione;

$t$  = tempo di percorso dell'onda.

E' necessario che i campioni presentino forme regolari, od almeno, superfici lisce in modo da aderire alle piastre della trasmittente e della ricevente (per ottenere un migliore contatto, è opportuno spalmare tali piastre con paraffina).

Nel caso in esame, per quasi tutti i campioni è stata effettuata almeno una misura lungo una delle tre direzioni dello spazio (AA', BB', CC'); la direzione AA' è perpendicolare alla stratificazione). La prova è stata effettuata su campioni "secchi".

Tabella 6 – Risalita capillare ponderale per unità di superficie relativa ai campioni della 2ª serie  
Legenda: S = superficie di base del campione; M = massa totale d'acqua assorbita dall'inizio dell'immersione

*Ponderal capillary rise for unit of area with regard to the 2nd series samples*  
Legend: S = base area of the sample; M = total mass of water absorbed since the beginning of the immersion

Campione	S (cm <sup>2</sup> )	Valori di 100 M/S dopo									
		1h	2h	4h	8h	24h	48h	72h	96h	104h	
1	51,0	8,2	9,6	11,7	14,7	20,5	26,0	27,0	28,2	28,4	
2a	56,0	6,2	7,1	8,0	10,7	13,9	17,8	19,6	20,8	21,2	
2A	92,0	33,4	35,5	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	
3	22,7	18,5	22,9	26,8	31,2	32,1	32,1	32,1	33,4	33,4	
4	13,4	40,2	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7	
4A	38,0	12,3	16,0	21,3	28,9	36,0	37,1	38,4	38,6	38,6	
5a	27,9	4,6	4,6	5,7	8,2	10,7	13,9	14,6	16,1	16,1	
6	26,8	2,6	2,9	5,5	8,9	13,0	14,5	14,5	14,9	14,9	

*Determinazione di N<sub>f</sub>*: avendo misurato i valori reali della velocità di propagazione delle onde (v<sub>l</sub>) ed avendo calcolato quelli teorici (v<sub>t</sub>) in base alla composizione mineralogica, è stato possibile calcolare l'indice di continuità (IC), altrimenti detto indice di qualità (IQ), tramite la relazione:

$$IC = \frac{v_l}{v_t} \cdot 100$$

Nello sviluppo dei calcoli si è posto per i calcari v<sub>t</sub> = 6660 m/s, valore verificato sperimentalmente dai ricercatori del Centro di Geomorfologia di Caen, mentre per le arenarie ed i "porfidi" si è proceduto, dopo un'analisi petrografica dei campioni, al calcolo di v<sub>t</sub> basandosi sulla composizione mineralogica percentuale; si è ritenuto opportuno, in seguito a ciò, porre, per le prime, v<sub>t</sub> = 6200 m/s, e, per i secondi, v<sub>t</sub> = 6000 m/s.

Sono state stabilite da studiosi francesi delle relazioni che collegano IC, N<sub>p</sub> e N<sub>f</sub>; IC, N<sub>p</sub> e N<sub>t</sub>; IC, N<sub>f</sub> e N<sub>t</sub> (secondo quanto emerso in precedenza, si sceglie il valore di N<sub>t</sub> o di N<sub>t</sub>' a seconda dei casi); in particolare, nel nostro caso, per la determinazione di N<sub>f</sub> e N<sub>p</sub> relativamente alle arenarie ed i "porfidi" si è fatto uso delle formule proposte da Durand (1978):

$$IC = 100 - 1,6 N_p - N_f$$

$$100 - IC - 1,6 N_t$$

$$N_f = \frac{IC - 100 + 50 N_t}{48,4}$$

$$N_p = \frac{IC - 100 + 50 N_t}{48,4}$$

Per i calcari, invece, si è ricorsi alla formula di Tourenq e Fourmaintraux (1974):

$$IC = 100 - 2 N_p - 25 N_f$$

$$N_f = \frac{100 - IC - 2 N_t}{23}$$

$$N_p = \frac{IC - 100 + 25 N_t}{23}$$

Naturalmente per il calcolo di N<sub>f</sub> e N<sub>p</sub>, è necessario conoscere preventivamente N<sub>t</sub>.

E' stato pure calcolato l'indice di anisotropia (IA), esprimibile tramite il rapporto v<sub>lmin</sub>/v<sub>lmax</sub>; tale indice è inversamente proporzionale all'omogeneità di un corpo (Tabb. 8, 9).

#### 4.1.9 Altre prove

Generalmente la caratterizzazione fisico-meccanica dei campioni di roccia si avvale anche dei dati derivanti dalle determinazioni della porosità accessibile al mercurio e della permeabilità all'acqua ed all'azoto.

Nel caso in esame tali prove sono state eseguite a

scopo puramente esemplificativo (Soldati, 1988), non disponendo di un numero elevato di campioni ed in considerazione del fatto che esse, prevedendo l'impiego di una carota, comportano la distruzione dei campioni medesimi e l'impossibilità, quindi, di utilizzarli per le successive prove di gelifrazione sperimentale.

Tabella 7 – Risalita capillare ponderale per unità di superficie relativa ai campioni della 3ª serie

Legenda: S = superficie di base del campione; M = massa totale d'acqua assorbita dall'inizio dell'immersione

*Ponderal capillary rise for unit of area with regard to the 3rd series samples*

*Legend: S = base area of the sample; M = total mass of water absorbed since the beginning of the immersion*

Campione	S (cm <sup>2</sup> )	Valori di 100 M/S dopo										
		1h	2h	4h	8h	24h	48h	72h	96h	7 gg	9 gg	14 gg
1	51	5,1	7,8	9,8	13,1	17,6	19,2	19,6	20,0	21,0	22,3	22,5
6	33	0,3	0,6	1,5	2,1	4,2	4,8	6,0	6,3	8,2	8,2	8,5
12	36	0,8	0,8	0,8	1,4	1,9	1,9	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5
20	27	0,7	1,1	1,5	1,8	4,0	4,8	5,5	5,9	8,1	8,1	8,5

## 4.2 Interpretazione dei risultati

### 4.2.1 Contenuto d'acqua

I campioni della 1a e della 2a serie (Tabb. 3, 4) presentano, in genere, valori relativamente bassi di contenuto d'acqua ( $N_w$ ,  $N_t$ ,  $N'_t$ ) a parte i calcari della Formazione a *Bellerophon* in "facies cavernosa"<sup>(7)</sup> (2, 2a) ed il gesso della stessa formazione (2A) (riguardo a quest'ultimo, si è dovuto affrontare il problema della dissoluzione allorché il campione era immerso in acqua; si è cercato di ovviare a questo inconveniente misurando, dopo ogni immersione, il nuovo peso secco, ma i dati raccolti sono risultati, inevitabilmente, imprecisi).

Posto che un certo valore di porosità s.l. è determinato dalla presenza di pori o di fessure, l'importanza degli uni o delle altre è stata evidenziata tramite la propagazione di onde ultrasoniche nei mezzi considerati. Appariva chiaro, infatti, già da una osservazione diretta dei campioni, che i valori di  $N_w$ ,  $N_t$ , e  $N'_t$  dei calcari e delle arenarie, pur essendo simili, avrebbero potuto essere diversamente influenzati dalla presenza di pori (calcari) o di fessure (arenarie).

Mettendo, inoltre, a confronto i valori di  $N_t$  e  $N'_t$  della

2a serie (per la 1a serie  $N'_t$  non è stato calcolato per i motivi già enunciati), si nota che essi non presentano sostanziali differenze (talora sono addirittura uguali); questo starebbe a significare che i campioni, dopo la prova di immersione sotto vuoto, erano già saturi.

Per quanto riguarda la 3a serie (Tab. 5), sono stati registrati, di nuovo, valori di  $N_w$ ,  $N_t$  e  $N'_t$  piuttosto bassi; i quattro gruppi presentano valori pressochè simili (la differenza, seppur contenuta tra i gruppi C e D, può essere dovuta alla maggiore alterazione dell'ultimo, verificata tramite un'analisi petrografica dei campioni in sezione sottile). Relativamente al confronto di valori di  $N_t$  e  $N'_t$  come per la 1a e la 2a serie, si notano differenze minime, il che, anche in questo caso, starebbe a significare la già ottenuta saturazione con la prova di immersione sotto vuoto.

### 4.2.2 Risalita capillare

Le prove di risalita capillare sono state effettuate sui campioni della 2a e della 3a serie (Tabb. 6, 7).

Esaminando dapprima le curve ponderali, si nota, riguardo alla 2a serie (Fig. 3), una certa differenza di comportamento dei vari litotipi. L'entità del fenomeno di risalita capillare è notevole per quanto concerne le Arenarie di Val Gardena (4A, 4), il calcare a *Bellerophon* in "facies massiva"<sup>(7)</sup> (3) ed il gesso (2A); appare, invece, minore per i calcari del Werfeniano e della Marmolada. Un comportamento intermedio è presentato dal "porfido" (1) e dal

(7) I termini tra virgolette si riferiscono alla nomenclatura adottata in laboratorio, per distinguere in modo chiaro i campioni.

calcare a *Bellerophon* in "facies cavernosa" (2a).

Per quanto attiene alla 3a serie (Fig. 5), della quale sono riportati i dati relativi ad un solo campione per gruppo, appare anomalo l'andamento della curva relativa al campione 1, anche in considerazione dell'omogeneità di risultati fino ad ora raccolti, concernenti i "porfidi".

Tale comportamento può essere spiegato supponendo che il notevole aumento di peso per assorbimento (alto valore di 100M/S) sia dovuto alla presenza di un certo numero di macrofessure facilmente raggiungibili dall'acqua. A testimonianza di questo, sono stati trovati valori molto bassi dell'indice di continuità (IC) con le prove di propagazione di onde ultrasoniche.

Per quanto riguarda le curve dell'altezza di risalita capillare, vengono evidenziate le diverse velocità di assorbimento di alcuni campioni della 2a e della 3a serie (Fig. 4, 6). Si nota ancora il comportamento anomalo del campione 1 della 3a serie.

Tabella 8 – Parametri ricavati tramite propagazione di onde ultrasoniche relativamente ai campioni della 2ª serie

Legenda: l = lunghezza del campione; t = tempo di percorso dell'onda ultrasonica; v = velocità dell'onda ultrasonica; IA = indice di anisotropia; IC = indice di continuità; N<sub>f</sub> = porosità dovuta a fessurazione; N<sub>p</sub> = porosità dovuta a pori; N<sub>t</sub> (o N'<sub>t</sub>) = contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto (o sotto pressione).

Parameters obtained through propagation of ultrasonic waves with regard to the 2nd series samples

Legend: l = length of the sample; t = run time of the ultrasonic wave; v = velocity of the ultrasonic wave; IA = anisotropy index; IC = continuity index; N<sub>f</sub> = porosity due to fissuration; N<sub>p</sub> = porosity due to pores; N<sub>t</sub> (or N'<sub>t</sub>) = water content after under vacuum (or under pressure) immersion.

Campione	Filtro	l (cm)	t (s)	v (m/s)	IA (-)	IC (-)	N <sub>f</sub> (%)	N <sub>p</sub> (%)	
1 N <sub>f</sub> = 4,20	AA'	0,2	8,9	58,5	1521,3	86,0	25,5	1,40	2,79
	BB'	0,2	7,3	53,5	1364,4		22,9	1,45	2,74
	CC'	0,2	7,1	44,8	1584,8		26,6	1,37	2,82
2a N <sub>f</sub> = 13,24	AA'	0,2	8,1	38,1	2125,9	39,0	31,9	0,94	12,3
	BB'	0,2	8,1	57,4	1411,1		21,1	1,16	8,55
	CC'	0,2	6,9	19,1	3612,5		54,2	0,48	13,33
2A N <sub>f</sub> = 10,58	AA'	0,2	5,8	83,2	697,1	19,4	10,4	3,06	6,43
	BB'	0,2	9,2	201,2	457,2		6,8	3,22	6,27
	CC'	0,2	10,3	43,8	2351,6		35,3	1,98	7,51
3 N <sub>f</sub> = 5,06	AA'	0,2	9,0	31,4	2866,2		43,0	2,04	2,98
	BB'								
	CC'								
4A N <sub>f</sub> = 5,77	AA'	0,2	8,8	64,8	1358,0	74,3	21,9	1,42	4,34
	BB'	0,2	5,3	29,1	1821,3		29,4	1,26	4,50
	CC'	0,2	6,9	37,8	1825,3		29,4	1,26	4,50
6 N <sub>f</sub> = 2,05	AA'	0,2	7,7	29,7	2592,5	65,3	38,9	2,47	0
	BB'	0,2	7,5	44,3	1693,0		25,4	3,06	0
	CC'								

#### 4.2.3 Velocità longitudinale di propagazione di onde ultrasoniche

Per quanto riguarda la 2a serie (Tab. 8) sono stati rilevati per tutti i litotipi valori assai bassi di IC, ai quali fanno riscontro percentuali molto alte di N<sub>f</sub>, tali da essere determinanti nella gelificazione dei campioni (relativa-

mente ad un calcare, si può ritenere che la microfessurazione abbia parte importante nel comportamento di una roccia sottoposta al gelo, quando N<sub>f</sub> > 0,3%; sembra che anche per altri litotipi si possa fare riferimento a questo valore, seppure con una maggiore precauzione).

I campioni della 3a serie (Tab. 9) sono caratterizzati, invece, da valori medi ed alti di IC e da percentuali di N<sub>f</sub> più basse rispetto alle precedenti (comunque > 0,3%) e quindi ancora significative. Si può notare complessi-

Tabella 9 – Parametri ricavati tramite propagazione di onde ultrasoniche relativamente ai campioni della 3ª serie

Legenda: l = lunghezza del campione; t = tempo di percorso dell'onda ultrasonica; v = velocità dell'onda ultrasonica; IA = indice di anisotropia; IC = indice di continuità; N<sub>f</sub> = porosità dovuta a fessurazione; N<sub>p</sub> = porosità dovuta a pori; N<sub>t</sub> (o N'<sub>t</sub>) = contenuto d'acqua per immersione sotto vuoto (o sotto pressione).

Parameters obtained through propagation of ultrasonic waves with regard to the 3rd series samples

Legend: l = length of the sample; t = run time of the ultrasonic wave; v = velocity of the ultrasonic wave; IA = anisotropy index; IC = continuity index; N<sub>f</sub> = porosity due to fissuration; N<sub>p</sub> = porosity due to pores; N<sub>t</sub> (or N'<sub>t</sub>) = water content after under vacuum (or under pressure) immersion.

Campione	Filtro	l (cm)	t (s)	v (m/s)	IA (-)	IC (-)	N <sub>f</sub> (%)	N <sub>p</sub> (%)		
Gruppo A	N <sub>f</sub> = 2,8	AA'	0,2	9,3	75,0	46,8	20,6	1,54	1,25	
		BB'	0,2	7,7	39,1		32,8	1,29	1,50	
		CC'	0,2	6,3	68,3		922	15,3	1,65	1,14
	N <sub>f</sub> = 3,2	AA'	0,2	9,2	25,2	3650	60,8	0,70	2,49	
		BB'								
		CC'								
N <sub>f</sub> = 1,8	AA'	0,2	7,6	16,9	4497	74,9	0,46	1,34		
	BB'									
	CC'									
N <sub>f</sub> = 6,6	AA'	0,2	7,2	20,0	3600	60,0	0,60	6,00		
	BB'									
	CC'									
Gruppo B	N <sub>f</sub> = 1,7	AA'	0,2	7,7	18,8	76,1	68,2	0,60	1,09	
		BB'	0,2	6,6	18,2		3626	60,4	0,76	0,93
		CC'	0,2	5,3	17,0		3117	51,9	0,93	0,76
	N <sub>f</sub> = 3,1	AA'	0,2	8,7	33,9	2566	42,7	1,08	2,01	
		BB'								
		CC'								
N <sub>f</sub> = 3,0	AA'	0,2	6,8	32,6	2085	34,7	1,25	1,75		
	BB'									
	CC'									
Gruppo C	N <sub>f</sub> = 0,8	AA'	0,2	7,7	15,9	4842	80,7	0,37	0,42	
		BB'								
		CC'								
	N <sub>f</sub> = 0,5	AA'	0,2	8,1	16,5	49,9	57,9	81,8	0,36	0,14
		BB'	0,2	6,4	13,6	4705		78,4	0,43	0,07
		CC'	0,2	5,8	20,4	2843		47,3	1,07	0,00
N <sub>f</sub> = 0,7	AA'	0,2	9,1	21,8	4174	69,5	0,60	0,09		
	BB'									
	CC'									
N <sub>f</sub> = 0,3	AA'	0,2	8,3	18,0	4611	76,8	0,47	0,00		
	BB'									
	CC'									
N <sub>f</sub> = 1,1	AA'	0,2	7,1	16,4	4329	72,1	0,54	0,56		
	BB'									
	CC'									
Gruppo D	N <sub>f</sub> = 7,2	AA'	0,2	9,0	49,5	1818	30,3	1,20	6,00	
		BB'								
		CC'								
	N <sub>f</sub> = 6,1	AA'	0,2	7,5	26,2	2862	47,7	0,87	5,22	
		BB'								
		CC'								
N <sub>f</sub> = 5,9	AA'	0,2	8,1	20,0	4050	67,5	0,47	5,42		
	BB'									
	CC'									
N <sub>f</sub> = 3,2	AA'	0,2	8,5	23,7	3586	59,7	0,72	2,47		
	BB'									
	CC'									
N <sub>f</sub> = 1,8	AA'	0,2	8,2	19,7	4162	84,8	69,3	0,57	1,22	
	BB'	0,2	4,5	12,4	3629		60,4	0,75	1,04	
	CC'	0,2	5,9	13,8	4275		71,2	0,53	1,26	
N <sub>f</sub> = 3,2	AA'	0,2	7,6	26,6	2857	47,6	0,97	2,22		
	BB'									
	CC'									

vamente una chiara uniformità di valori di N<sub>f</sub>, il che fa ritenere che tali campioni presentino una densità di microfessurazioni simile. Questo viene a conferma dell'ipo-

tesi precedentemente formulata, secondo la quale il fattore tettonica può essere considerato una costante. Il comportamento anomalo del campione 1, già riscontrato nelle prove di risalita capillare, è bene evidenziato in Tab. 9, dove si leggono valori notevolmente bassi di IC e valori di  $N_f$  superiori di una unità per cento rispetto a quelli degli altri "porfidi".

Attualmente sono in corso determinazioni dei suddetti parametri sui "nuclei" non disgregati dei campioni sottoposti alla gelifrazione sperimentale. Se i risultati apparissero significativi potrebbero essere oggetto di una successiva nota.

#### 4.2.4 Considerazioni

Lo studio delle proprietà fisico-meccaniche, per ricerche sul crioclastismo, assume una notevole importanza poichè, oltre a fornire un primo inquadramento sulle rocce in esame, può dare indicazioni sulla gelività dei campioni, già prima che questi vengano sottoposti a prove di gelifrazione sperimentale.

Sono state proposte, addirittura, delle scale di gelività che permettono di valutare con una certa attendibilità la predisposizione al gelo dei calcari senza dover ricorrere alle suddette prove sperimentali<sup>(8)</sup>.

Per la maggior parte delle rocce analizzate (arenarie e "porfidi") non è, però, possibile fare riferimento ad una scala di questo tipo, poichè esse presentano dei valori di porosità diversi da quelli delle rocce calcaree: questo comporta, nella determinazione di una scala di gelività, l'intervento di fattori diversi o dei medesimi, ma in proporzioni differenti.

Nel caso particolare, dunque, la valutazione delle proprietà fisico-meccaniche è stata sì indicativa del comportamento dei vari litotipi, ma ha dovuto, necessariamente essere supportata dai dati ottenuti dalla gelifrazione sperimentale.

A questo punto, si poteva comunque già verosimilmente ipotizzare che l'alto grado di fessurazione riscontrato nella maggior parte dei campioni avrebbe costituito l'elemento condizionante, seppure in termini di tempo più o meno lunghi, della gelifrazione a cui i campioni medesimi sarebbero stati sottoposti.

## 5. ESPERIENZE DI LABORATORIO: GELIFRAZIONE SPERIMENTALE

(8) La prima proposta di scala di gelività risale a Lautridou (1971), la seconda a Lautridou ed Ozouf (1978), la terza, la più articolata e completa, a Letavernier (1984). Quest'ultimo propone quattro classi che qui vengono riportate in ordine decrescente di gelività:

- classe I (rocce microfessurate)
- classe II (rocce a pori medi)
- classe III (rocce permeabili)
- classe IV (rocce microporose)

### 5.1 Premessa

I campioni di roccia, dopo essere stati caratterizzati dal punto di vista fisico-meccanico, sono stati sottoposti a gelifrazione sperimentale in apposite camere refrigeranti, all'interno delle quali si è cercato di riprodurre le condizioni ambientali naturali. Senza dubbio, la riproduzione delle stesse rappresenta l'aspetto più delicato, in studi siffatti, a causa della molteplicità e della complessità dei fenomeni naturali. Talora, infatti, si rischia di imporre delle semplificazioni che, a lungo termine, potrebbero falsare i risultati delle prove, o portare a considerazioni finali non sempre esatte. A ciò si può in parte ovviare, rivolgendo grande attenzione non solo all'allestimento delle condizioni sperimentali, ma anche interpretando i risultati tenendo conto degli aspetti climatici, morfologici e litologico-strutturali presenti in natura.

La ricerca sperimentale è stata condotta sulla 1a e sulla 2a serie di campioni, per confrontare, qualora esistessero, differenze di gelività relativamente ai diversi litotipi; sulla 3a serie, per verificare l'eventuale similarità di comportamento dei quattro gruppi di "porfidi", sotto l'azione dei cicli di gelo e disgelo, e pertanto verificare se il fattore litologia poteva essere considerato una costante. Con tali finalità, quindi, sono state valutate la quantità, la morfologia e la granulometria dei gelifratti ottenuti.

### 5.2 Modalità di congelamento

Sulla base delle esperienze maturate negli ultimi anni dai ricercatori del Centro di Geomorfologia di Caen, si sono individuati i principali parametri climatici che intervengono nella gelifrazione; nel caso particolare sono stati presi in considerazione l'intensità di congelamento, la velocità di diminuzione della temperatura, il contenuto d'acqua iniziale dei campioni.

Ad ognuno di questi parametri è stato assegnato un valore, tale da avvicinarsi il più possibile a quello rilevabile sul terreno (i valori vengono, di solito, mantenuti costanti, per poter confrontare i risultati di prove effettuate in tempi anche diversi).

La durata dei cicli di gelo e disgelo è la stessa per ogni tipo di esperienza: 24 ore (12 ore di gelo fino a -12°C; 12 ore di disgelo fino a +15°C).

*Intensità di congelamento:* è stato scelto il valore di -12°C, ritenuto il più attendibile per quanto riguarda la Valle di S. Pellegrino, e ciò anche in base a precedenti ricerche condotte sulle Alpi e sul Giura.

*Velocità di diminuzione della temperatura:* è stato scelto un valore di circa 4+5°C/h a partire da 0°C fino alla temperatura minima, secondo i criteri di cui sopra.

*Contenuto d'acqua iniziale dei campioni:* i campioni sono stati saturati tramite immersione di 48 ore: il corrispondente contenuto d'acqua rappresenterebbe una condizione ricorrente in natura, cioè quella di una roccia parzialmente essiccata che viene progressivamente a contatto con acqua (Letavernier, 1984). Va ammesso, però,

che, anche se si fosse saturata la roccia sotto vuoto o sotto pressione, come si suole fare per studi relativi a zone particolarmente umide, avremmo ottenuto risultati sostanzialmente simili, considerando la scarsa porosità dei campioni in esame.

I campioni sono stati posti all'interno di vaschette di plastica, secondo il loro senso di polarità (tracciato sui campioni all'atto del prelievo), ed immersi in una lama d'acqua, mantenuta ad una altezza costante di circa 2 cm, al fine di assicurare una certa disponibilità di umidità e per compensare l'evaporazione. Dopo tale preparazione, le rocce sono state poste nella camera refrigerante. I risultati riportati si riferiscono a 600 cicli di gelo e disgelo per ciascuna serie.

### 5.3 Descrizione ed interpretazione dei risultati

Su tutti i campioni sono state effettuate periodiche osservazioni (all'inizio quotidiane), concernenti i processi di frammentazione, nonché determinazioni del peso dei gelifratti preventivamente essiccati (Tabb. 10, 11, 12).

Tabella 10 – Gelifrazione dei campioni della 1ª serie

Legenda:  $W_d$  = peso secco;  $W$  = peso;  $D$  = disgregato; (1) allargamento fessure; (2) 1 frammento (64 g); (3) 5 frammenti principali (553; 468; 187; 76; 45 g) e detrito fine; (4) 4 frammenti principali (186; 103; 76; 45 g) e detrito fine; (5) 1 frammento (119 g); (6) 2 frammenti principali (97; 50 g); (7) 2 frammenti principali (91; 16 g); (8) 2 frammenti principali (52; 10 g); (9) 2 frammenti principali (12; 10 g); (10) 2 frammenti principali (655; 101 g)  
*Frost shattering of the 1st series samples*  
 Legend:  $W_d$  = dry weight;  $W$  = weight;  $D$  = shattered; (1) fissures enlargement; (2) 1 fragment (64 g); (3) 5 main fragments (553; 468; 187; 76; 45 g) and fine debris; (4) 4 main fragments (186; 103; 76; 45 g) and fine debris; (5) 1 fragment (119 g); (6) 2 main fragments (97; 50 g); (7) 2 main fragments (91; 16 g); (8) 2 main fragments (52; 10 g); (9) 2 main fragments (12; 10 g); (10) 2 main fragments (655; 101 g)

Campione	1	2	3	4a	4b	4A	5a	5b	6	
$W_d$ (g)	1180	646	1419	758	201	874	758	471	1072	
1                     	W dei gelifratti (g)									
	1	0,0	5,5	0,0	0,5	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	0,0	25,0	0,0	1,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5	0,0	257,0	0,0	11,0	D <sup>(6)</sup>	0,0	0,0	0,0	0,0
	7	0,0	D	0,0	15,0	D	0,0	0,0	0,0	0,0
	9	0,0	D	0,0	59,0	D	0,0	0,0	0,0	0,0
	11	0,5	D	0,0	68,0	D	0,0	0,0	0,0	0,0
	14	1,0	D	1,0	71,5	D <sup>(7)</sup>	1,0	0,0	0,0	0,5
	21	1,0	D	1,0	140,0	D	1,5	0,0	0,0	0,5
	33	2,0	D	2,0 <sup>(1)</sup>	195,0	D <sup>(8)</sup>	2,0	0,0	0,5	0,5
	71	3,0	D	68,5 <sup>(2)</sup>	485,0 <sup>(3)</sup>	D <sup>(9)</sup>	4,0	0,0	1,0	1,0
287	4,0	D	D <sup>(4)</sup>	D	D	72,0	2,0	1,0	2,0	
336	4,5	D	D <sup>(5)</sup>	D	D	87,0	2,5	1,0	2,5	
454	6,0	D	D	D	D	112,0	2,5	1,0	2,5	
600	6,5	D	D	D	D	187,0	2,7 <sup>(10)</sup>	1,0	3,5	

Relativamente alla 1a ed alla 2a serie, possiamo distinguere campioni piuttosto gelivi, da altri che hanno subito modificazioni minime. Tra i primi compaiono le Arenarie di Val Gardena, soprattutto quelle in "facies

fine"<sup>(7)</sup>, nonché i calcari ed il gesso della Formazione a *Bellerophon*. Molto meno gelivi appaiono i "porfidi", i calcari della Formazione di Werfen ed il Calcare della Marrolada.

In particolare:

Arenarie di Val Gardena:

- a) in "facies grossolana"<sup>(7)</sup> (4A, 4A) - i campioni si presentavano in partenza ben cementati; questo, probabilmente, insieme all'assenza di stratificazione, ha determinato una degradazione per disgregazione granulare;
- b) in "facies fine" (4a, 4b, 4) - si sono dimostrate, senza dubbio, le rocce più gelive. Già dopo una decina di cicli, presentavano un'evidente degradazione; il processo principale è stato rappresentato dal distacco di frammenti, per lo più paralleli alla fitta stratificazione. Si è verificata, pure, una disgregazione granulare con produzione di sabbie più o meno fini; la frammentazione completa è avvenuta intorno al ciclo n° 100. Doveroso, però, considerare come scarsa fosse la cementazione dei campioni;

Tabella 11 – Gelifrazione dei campioni della 2ª serie

Legenda:  $W_d$  = peso secco;  $W$  = peso;  $D$  = disgregato; (1) 8 frammenti principali e detrito fine  
*Frost shattering of the 2nd series samples*  
 Legend:  $W_d$  = dry weight;  $W$  = weight;  $D$  = shattered; (1) 8 main fragments and fine debris

Campione	2a	2A	3	4	5a	6	
$W_d$ (g)	886	1014	437	268	849	645	
1           	W dei gelifratti (g)						
	7	30,5	2,0	0,0	70,5	0,0	0,0
	19	33,0	4,0	0,0	81,0	0,0	0,0
	57	57,0	59,0	0,0	114,0	5,5	0,0
	273	100,0	D	D <sup>(1)</sup>	D	31,0	3,0
	322	106,0	D	D <sup>(1)</sup>	D	31,5	3,0
	440	109,0	D	D <sup>(1)</sup>	D	61,0	4,0
600	120,0	D	D <sup>(1)</sup>	D	65,0	4,5	

Calcari della Formazione a *Bellerophon*:

- a) in "facies cavernosa" (2, 2a) - verosimilmente, non fa testo il campione 2, che dopo 7 cicli era già totalmente disgregato, pur presentando ancora qualche elemento di diametro superiore a 3 cm; probabilmente ha avuto grande influenza lo stato d'alterazione iniziale; meno rapida è stata l'evoluzione del campione 2a, che pure ha fornito gelifratti di dimensioni rilevanti, insieme a materiale più fine;
- b) in "facies massiva" (3, 3) - il processo di frammentazione che li caratterizza è sostanzialmente diverso dai precedenti. In questo caso, un ruolo fondamentale è stato sostenuto dalla presenza di microfessurazioni che hanno determinato il tipo di disgregazione. Si è notato il progressivo allargamento di tali fessurazioni, fino allo sbloccamento del campione; il materiale fine è risultato relativamente scarso;
- c) gesso (2A) - si è dimostrato molto gelivo; ha mante-

nuto una certa compattezza fino ad un centinaio di cicli, per poi frammentarsi in elementi per lo più allungati parallelamente alla stratificazione. Anche in questo caso è risultata determinante la presenza di discontinuità; da ricordare, inoltre, l'instaurazione di fenomeni dissolutivi.

Calcarei della Formazione di Werfen (5a, 5b, 5a):

I campioni 5a e 5b della 1a serie hanno avuto una reazione minima (qualche g di sabbia), mentre il campione 5a della 2a serie, dopo circa 100 cicli, ha iniziato a subire un lento distacco di alcune scaglie

(desquamazione).

Calcarei della Marmolada (6, 6):

Hanno dimostrato scarsa gelività, con produzione di minuti frammenti e di qualche grammo di sabbia, a partire dal 70° ciclo circa.

"Porfidi":

Relativamente ai campioni della 3a serie, l'intento principale è stato quello di dimostrarne l'omogeneità di comportamento; in effetti, i vari tipi di "porfidi", come si poteva prevedere dall'esame delle proprietà fisico-

Tabella 12 – Gelifrazione dei campioni della 3ª serie

Legenda:  $W_d$  = peso secco;  $W$  = peso; (1) 2 frammenti principali (25; 3,5 g); (2) 1 frammento (16 g); (3) 4 frammenti principali (29; 26; 3,5; 1 g); (4) 4 frammenti principali (28; 26; 3,5; 2,5 g)

*Frost shattering of the 3rd series samples*

Legend:  $W_d$  = dry weight;  $W$  = weight; (1) 2 main fragments (25; 3,5 g); (2) 1 main fragment (16 g); (3) 4 main fragments (29; 26; 3,5; 1g); (4) 4 main fragments (28; 26; 3,5; 2,5 g)

Campione	2	3	4	5	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	21	
$W_d$ (g)	859	871	808	653	979	645	782	1213	667	780	844	506	597	760	573	819	640	
	W dei gelifratti (g)																	
di ciclo n°	37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3,0	1,5	0,0	
	71	0,0	0,0	2,5	0,0	0,5	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	24,0	5,5	5,0	2,0	1,0	
	164	0,0	0,0	2,5	29,5 <sup>(1)</sup>	1,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	26,0	7,0	8,0	3,0	1,0	
	270	0,5	0,5	3,5	30,5 <sup>(1)</sup>	1,5	0,5	2,0	2,5	1,0	0,5	1,0	17,0 <sup>(2)</sup>	27,0	16,0	8,0	22,0	1,0
	388	0,5	0,5	4,0	61,5 <sup>(3)</sup>	1,5	0,5	2,5	3,0	1,0	0,5	1,0	18,5 <sup>(2)</sup>	31,5	17,0	8,5	25,0	1,5
	600	1,0	1,0	4,5	63,0 <sup>(4)</sup>	1,5	1,0	2,0	3,5	1,5	1,0	1,5	18,0 <sup>(2)</sup>	84,0	23,0	9,0	31,0	3,5

meccaniche, hanno presentato, complessivamente, modalità simili di frammentazione: in particolare, il fenomeno prevalente si è rivelato quello della disgregazione granulare, con produzione di sabbia più o meno fine, talora accompagnato dal distacco di scaglie (5, 15), in corrispondenza di microfessure.

Emerge, però, che quasi tutti i campioni del gruppo D hanno fornito una quantità di sabbia più rilevante, ma ciò era in parte preventivabile, data la loro maggiore alterazione iniziale. Tale alterazione deve essere comunque considerata come localizzata ad un'area ristretta e non estendibile ad ampie porzioni del versante. Infatti, considerando, fra l'altro, il campione 21, prelevato nelle vicinanze, si nota tanto l'assenza di alterazioni, quanto una produzione di gelifratti rientrante nella norma. Una conferma ulteriore dell'omogeneità di comportamento può essere fornita dai dati relativi ai campioni di "porfido" del Col Margherita, facenti parte della 1a e della 2a serie (caratteristiche petrografiche corrispondenti a quelli del gruppo B).

Si può, dunque, concludere, sulla base di tutti gli

elementi fin qui raccolti che la litologia nell'ambito delle diverse varietà di "porfidi", può essere verosimilmente considerata una costante; è da ritenersi, quindi, che questo fattore non abbia influenza significativa sull'evoluzione dei versanti studiati.

Per quanto riguarda i processi di frammentazione, rilevabili in laboratorio, si è notato che, a lungo termine, andavano assumendo sempre maggiore importanza, accanto ai fenomeni di disgregazione granulare, quelli di distacco di blocchi e scaglie connessi alla microfessurazione, già in parte osservati e preventivabili in base all'osservazione di un allargamento progressivo delle discontinuità.

#### 5.4 Limiti delle indagini di laboratorio

Per quanto riguarda la 3a serie, l'entità della gelifrazione sperimentale non è risultata certamente rilevante (sia pure dopo 600 cicli di gelo e disgelo). In base alle osservazioni compiute sul terreno, e con riferimento a ricerche precedenti, si può sostenere che la scarsità di gelifratti non comporta necessariamente che i "porfidi"

siano poco gelivi in natura. A questo proposito, è verificata la tendenza di rocce magmatiche e metamorfiche ad essere pressochè immuni, in tempi relativamente brevi, agli effetti del crioclastismo in condizioni sperimentali, mentre si hanno per le medesime rocce importanti esempi di evoluzione delle forme del rilievo dovute all'azione del gelo (McGreevy & Whalley, 1982). Questo paradosso può essere spiegato considerando come, in laboratorio, vengano utilizzati blocchi di "roccia intatta" (Coates, 1964), rappresentanti una porzione molto limitata di un ammasso roccioso ("roccia massiva") (Attewell & Farmer, 1976). Una "roccia massiva", è bene ricordarlo, può essere attraversata da fratture, faglie, piani di stratificazione, di clivaggio e di scistosità che la suddividono in diverse unità, ciascuna identificabile come "roccia intatta". In questo caso, risulterebbe, dunque, riduttivo impiegare soltanto i risultati delle esperienze di gelifrazione per indagini, ad esempio, sui depositi di versante, qualora la dimensione dei gelifratti fosse principalmente controllata da maglie di fratturazione piuttosto ampie (McGreevy & Whalley, 1982). Appare, quindi, necessario interpretare i risultati tenendo sempre conto delle "condizioni in situ" e valutarli anche in funzione di una possibile interazione in natura tra condizioni di stress e di carico, difficilmente replicabili in laboratorio, e tipo di degradazione.

Infine, un ulteriore problema, che potrebbe rendere difficile l'interpretazione dei dati di laboratorio, è costituito dai contrastanti regimi di temperatura offerti da rocce di colore diverso nelle stesse condizioni di esposizione, a causa del loro ineguale potere riflettente. Tale problema non si è posto, nell'ambito dello studio svolto, in quanto la relazione terreno-laboratorio è fondata sui risultati relativi unicamente ai "porfidi", che non presentano tonalità di colore sostanzialmente diverse.

## 5.5 Considerazioni

Le esperienze di gelifrazione sperimentale hanno permesso, da un lato, di confrontare processi di degradazione, che si sono evoluti con modalità e ritmi diversi a seconda dei litotipi (1a e 2a serie), dall'altro, di confermare l'ipotesi iniziale che il fattore litologia, per quanto riguarda i "porfidi", (3a serie) fosse una costante. Riguardo a quest'ultimo punto, assunto che la tettonica abbia conferito alle rocce di entrambi i fianchi della valle uno stesso grado di microfessurazione, si può affermare, tramite l'osservazione di comportamenti omogenei per la quasi totalità dei campioni, nel corso di 600 cicli, che pure il fattore litologia non ha condizionato in passato e non dovrebbe condizionare in futuro la diversa evoluzione dei versanti.

Per quanto attiene alla gelifrazione naturale, essa è, probabilmente, controllata in profondità da maglie di fessurazione che isolano blocchi di "roccia intatta"; tali blocchi possono poi risentire individualmente di processi di degradazione simili a quelli sperimentati in

laboratorio (disgregazione granulare e distacco di scaglie).

## 6. RELAZIONE TERRENO-LABORATORIO

### 6.1 Premessa

Nel presente capitolo si enunciano i risultati ottenuti dal confronto dei dati scaturiti dallo studio bibliografico, dalle indagini sul terreno, nonché dalle esperienze di laboratorio.

### 6.2 Influenza del fattore esposizione e variabilità dell'azione del crioclastismo

Alla luce delle indagini svolte si può verosimilmente affermare che l'elemento condizionante il diverso modellamento dei versanti, nell'area studiata, sia essenzialmente di tipo climatico e che, in particolare, consista nella diversa esposizione dei versanti medesimi. Quest'ultima, determinando una differente insolazione e, di conseguenza, regimi termici ineguali avrebbe provocato una più lunga permanenza dei ghiacciai sul fianco meridionale della valle; la presenza dei ghiacciai stessi, oltre ad esercitare un'azione di modellamento, avrebbe protetto tale fianco, mentre quello settentrionale sarebbe stato maggiormente sottoposto agli effetti del gelo e disgelo. La diversa esposizione avrebbe, inoltre, consentito, dopo il ritiro dei ghiacciai, e consentirebbe attualmente una più duratura permanenza della neve sul versante esposto a N, il che garantirebbe ancora un effetto protettivo diversificato sui due versanti.

Sebbene le rocce del fianco meridionale della valle dispongano di un più continuo apporto di umidità, a causa di una più lenta fusione della neve, e risentano di una maggiore intensità di congelamento, si può pensare che, nel caso in esame, giochi un ruolo più importante la frequenza di tali cicli, indubbiamente molto maggiore sul fianco settentrionale.

Infine, la diversa esposizione potrebbe dare origine ad una gelifrazione più marcata sul versante esposto a S, anche quando il manto nevoso è ovunque assente, a seguito del maggior numero di oscillazioni intorno a 0°C che si verificano sul versante medesimo.

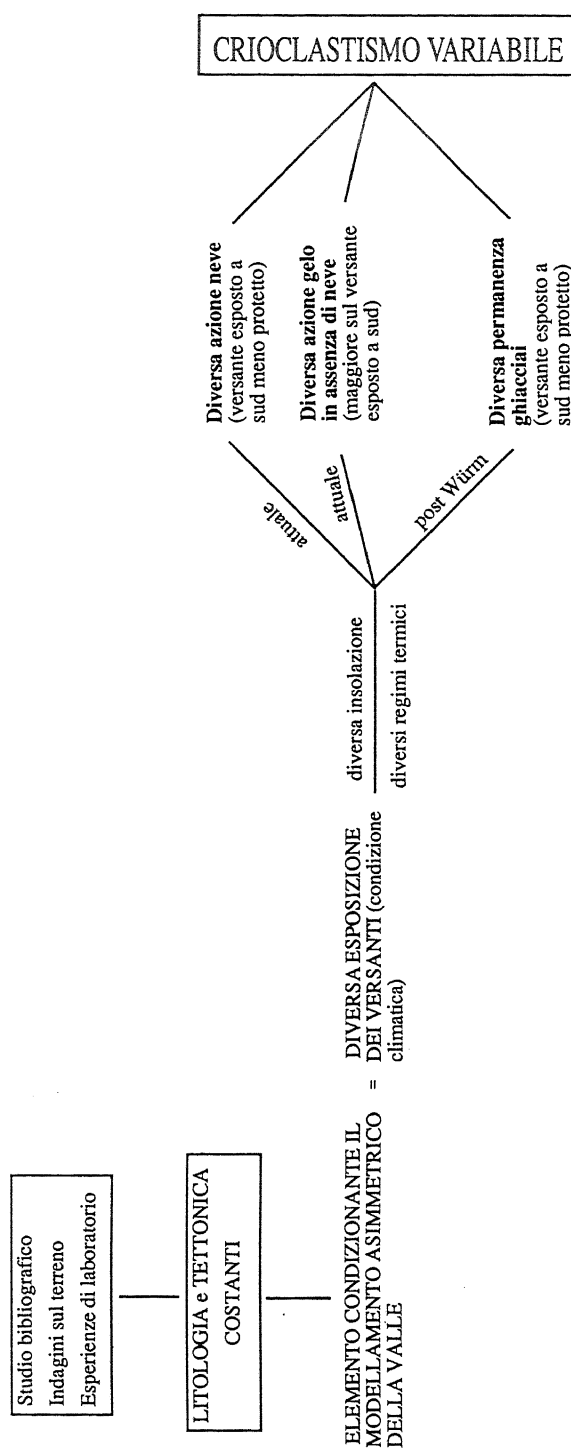
### 6.3 Conclusioni

Il risultato più importante scaturito dalla relazione terreno-laboratorio consiste nell'aver provato che la già evidenziata variabilità del crioclastismo ha costituito e costituisce attualmente un elemento fondamentale nel modellamento dei versanti dell'alta Valle di S. Pellegrino (Schema 1, a fianco); a tale conclusione si è giunti constatando che i fattori litologia e tettonica sono, nel caso in esame, pressochè considerabili come costanti.

La costanza del fattore litologia, pur essendo presenti nell'ambito dei "porfidi" diverse varietà petrografiche, è emersa, da un lato, dalla similarità delle caratteri-



stiche fisico-meccaniche dei campioni analizzati in laboratorio e, dall'altro, dall'equivalente predisposizione al gelo degli stessi.



Per quanto riguarda il fattore tettonico, invece, i maggiori elementi a dimostrazione della sua invariabilità sono derivati tanto dall'indagine bibliografica, quanto dalle osservazioni compiute sul terreno; un'importante

conferma è poi scaturita dalle prove di propagazione di onde ultrasoniche.

Nell'ambito dello studio compiuto si è, peraltro, cercato di valutare l'influenza di altre cause quali processi chimici, umidificazione ed essiccazione, termoclastismo, ecc., giungendo alla conclusione che essi, pur presentandosi talora con intensità diverse sui due versanti considerati, non debbono avere condizionato in modo sensibile il modellamento della valle.

Per quanto riguarda i fenomeni torrentizi, essendo stati più intensi sul versante settentrionale, come in precedenza enunciato essi hanno fatto sì che i detriti venissero più facilmente evacuati da tale versante; a ciò sarebbe, dunque, dovuta la più ampia presenza di depositi di versante sul fianco meridionale della valle.

Bisogna, infine, puntualizzare che, per giungere alle summenzionate conclusioni si sono dovute compiere, talora, delle semplificazioni considerate necessarie per l'applicazione della metodologia seguita; al proposito si ritiene, però, che esse non abbiano avuto influenze significative sui risultati finali.

## RINGRAZIAMENTI

Esprimo la mia più viva gratitudine ai Proff. Mario Panizza e Alberto Carton per la lettura critica del testo e per i preziosi consigli. Ringrazio sentitamente, inoltre, i Proff. Jean-Claude Flageollet e Jean-Pierre Lauridou, nonché i Drr. Jean-Claude Ozouf e Yves Delehaye per la produttiva collaborazione e per la gentile ospitalità offertami presso il Centro di Geomorfologia del CNRS di Caen.

Il lavoro è stato eseguito nell'ambito delle ricerche geomorfologiche finanziate dal C.N.R. (contributo 88.01601.05, responsabile Prof. Mario Panizza, Istituto di Geologia, Università di Modena).

## BIBLIOGRAFIA

- Ansted D.T. (1871) - *On some phenomena of the weathering of rocks, illustrating the nature and extent of subaerial denudation*. Trans. Cambridge Philosoph. Soc., **11**, 387-395.
- Attewell P.B. & Farmer I.W. (1976) - *Principles of Engineering Geology*. Chapman and Hall, London, 1045 pp.
- Battle W.R.B. (1960) - *Temperature observations in Bergschrunds and their relationships to frost shattering*. In: Lewis W.V.(ed.) "Norwegian cirque glaciers", Roy. Geogr. Soc. Res. Ser., **4**, 83-95.
- Battle W.R.B. & Lewis W.V. (1951) - *Temperature observations in Bergschrunds and their relationships to cirque erosion*. J. Geol., **59**, 537-545.
- Bianchi Castiglioni G. (1960) - *Osservazioni morfologi-*

- che sulla Valle di S. Pellegrino nelle Dolomiti. Riv. Geogr. It.*, **67**(4), 339-415.
- Birkeland P.W. (1974) - *Pedology, weathering and geomorphological research*. Oxford University Press, New York, 285 pp.
- Birrot P. (1968) - *The cycle of erosion in different climates*. Batsford, London, 144 pp.
- Bousquié P. (1979) - *Texture et porosité de roches calcaires. Relations avec perméabilité, ascension capillaire, gélivité, conductivité thermique*. Thèse Doct. - ing., Univ. P. et M. Curie et Ecole des Mines, Paris, 191 pp.
- Bridgman P.W. (1912) - *Water in the liquid and five solid forms, under pressure*. Proc. Amer. Acad. Arts Sci., **47**, 439-558.
- Brochu M. (1964) - *Essais de définition des grandes zones périglaciaires de globe*. Z. Geomorph., **8**, 32-39.
- Brockie W.S. (1972) - Experimental frost shattering. Proc. 7th New Zealand Geogr. Conf., N.Z. Geogr. Soc., Conf. Ser., **7**, 177-186.
- Büdel J. (1963) - *Klimagenetische Geomorphologie*. Geogr. Rundschau, **15**, 269-285.
- Castiglioni B. (1926) - *Sulla morfologia della Valle del Biois (Alpi Dolomitiche)*. Boll. Soc. Geol. It., **45**, 193-221.
- Castiglioni B. (1930a) - *Ricerche glaciologiche in Alto Adige*. In: Atti XI Congr. Geogr. Ital., Napoli, vol. 2, 107-113.
- Castiglioni B. (1930b) - *Tracce glaciali postwürmiane nelle Dolomiti*. In: Atti Soc. Ital. Progr. Scienze, XIX Riunione.
- Castiglioni G.B. (1964) - *Sul morenico stadiale delle Dolomiti*. Mem. Ist. Geol. Min. Univ. Padova, **24**, 1-16.
- Coates D.F. (1964) - *Classification of rocks for rock mechanics*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci., **1**, 421-429.
- Connell D.C. & Tombs J.M.C. (1971) - *The crystallization pressure of ice - a simple experiment*. J. Glac., **10**, 312-315.
- Dogliani C. (1984) - *Tettonica triassica transpressiva nelle Dolomiti*. Giorn. Geol., **46**(2), 47-60.
- Dunn J.R. & Hudcok P.P. (1966) - *Water, clay and rock soundness*. Ohio J. Sci., **66**, 153-168.
- Durand G. (1978) - *Contribution à l'étude de la microfissuration des roches*. Thèse 3e cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris, 88 pp.
- Evans I.S. (1970) - *Salt crystallization and rock weathering: a review*. Rev. Géomorphol. Dynam., **19**, 153-177.
- Everett D.H. (1961) - *The thermodynamics of frost damage to porous solids*. Trans. Faraday Soc., **57**, 1541-1551.
- Francou B. (1982) - *Chutes de pierres et éboulisation dans les parois de l'étage périglaciaire*. Rev. Géogr. Alp., **70**, 279-300.
- Francou B. (1983) - *Géodynamique des dépôts de pied de paroi dans l'étage périglaciaire*. Rev. Géol. Dynam. et Géogr. Phys., **24**(5), 411-424.
- Francou B. (1988a) - *Temperatures de parois rocheuses et gélifraction dans les Andes Centrales du Pérou*. Bull. Centre Géom. CNRS Caen, **34**, 159-180.
- Francou B. (1988b) - *L'éboulisation en haute montagne. Contribution à l'étude du système corniche-éboulis en milieu périglaciaire*. Thèse d'Etat, Univ. Paris VII, 696 pp.
- Fraser J.K. (1959) - *Freeze-thaw frequencies and mechanical weathering in Canada*. Arctic, **12**, 40-53.
- Fukuda M. (1983) - *The pore water pressure profile in porous rocks during freezing*. Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, National Academy Press, Washington D.C., 433-438.
- Gardner J.S. (1969) - *Snowpatches: their influence on mountain wall temperatures and the geomorphic implications*. Geogr. Annl., **51A**, 114-120.
- Geiger R. (1965) - *The climate near the ground*. Harvard University Press, Massachusetts, 611 pp.
- Ghezzi C. (1967) - *Le vulcaniti paleozoiche nell'area centro-orientale del complesso effusivo atesino*. Min. Petr. Acta, **13**, 339-408.
- Grawe O.R. (1936) - *Ice as an agent of rock weathering. A review*. J. Geol., **44**, 173-182.
- Hall K.J. (1975) - *Nivation processes at a late-lying, north-facing snowpatch site in Austre Okstindbredalen, Okstindan, northern Norway*. M Sc thesis, Univ. Reading, 307 pp.
- Hallet B. (1983) - *The breakdown of rock due to freezing: a theoretical model*. Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, National Academy Press, Washington D.C., 433-438.
- Högbom G. (1899) - *Ragun dadeleas geologi*. SGU, Series C, 182 pp.
- Keeble A.B. (1971) - *Freeze-thaw cycles and rock weathering in Alberta*. Albertan Geogr., **7**, 34-42.
- Konischev V.N. (1978) - *Frost weathering*. Proc. Permafrost 2nd Int. Conf., Yakutsk 1973, National Academy of Sciences, Washington D.C., 176-181.
- Lautridou J.P. (1971) - *Conclusions générales des recherches de gélifraction expérimentale du Centre de Géomorphologie*. Bull. Centre Géom. CNRS Caen, **10**, 63-84.
- Lautridou J.P. (1976) - *Les expériences de cryoclastie*. Bull. Centre Géom. CNRS Caen, **21**, 21-28.
- Lautridou J.P. (1985) - *Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie*. Thèse d'Etat, Centre Géom. CNRS Caen, 908 pp.
- Lautridou J.P., Mazo L., Ozouf J.C. & Benoist J.P. (1977) - *Etude des mécanismes du gel dans la pierre de Caen*. 6e Congrès Fond. Fr. Et. Nord., Le Havre 1975, rap. 309.
- Lautridou J.P. & Ozouf J.C. (1978) - *Relations entre la gélivité et les propriétés physiques (porosité, ascen-*

- sion capillaire) des roches calcaires. RILEM/ UNESCO Symposium, Paris, rap. 3.3, 15 pp.
- Lautridou J.P. & Ozouf J.C. (1980a) - *Acquisitions nouvelles sur la porosité et sur la perméabilité des roches au cours des dix dernières années*. In: *Definition de normes d'analyses physiques de roches*, Centre Géom. CNRS Caen, 22 pp.
- Lautridou J.P. & Ozouf J.C. (1980b) - *Etude critique des normes employées. Proposition de nouvelles normes*. In: *Definition de normes d'analyses physiques de roches*, Centre Géom. CNRS Caen, 27 pp.
- Lautridou J.P. & Ozouf J.C. (1982) - *Experimental frost shattering: 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS*. Prog. Phis. Geog., 6(2), 215-232.
- Leonardi P. (1967) - *Le Dolomiti. Geologia dei monti tra Isarco e Piave*. Manfrini, Rovereto, 1019 pp.
- Letavernier G. (1980) - *Processus de destruction des roches calcaires par le gel et fraction grossière*. Maîtrise géogr., Univ. Caen, 106 pp.
- Letavernier G. (1984) - *La gélivité des roches calcaires. Relations avec la morphologie du milieu poreux*. Thèse 3e cycle, Univ. Caen, 181 pp.
- Lozinski W. (1912) - *Die periglaziale Fazies der mechanischen Verwitterung*. 11th Int. Geol. Congr., Stockholm 1910, Compte Rendu, 1039-1053.
- Mantovani F. (1987a) - *Carta geologica del Passo di San Pellegrino (Dolomiti)*. Grafica ferrarese.
- Mantovani F. (1987b) - *Carta geomorfologica del P.so di S. Pellegrino (Dolomiti)*. Grafica ferrarese.
- Martini A. (1967) - *Preliminary experimental studies on frost weathering of certain rock from the West Sudetes*. Biul. Peryglac., 16, 147-194.
- Mathys H. (1974) - *Klimatische Aspekte zur Frostverwitterung in der Hochgebirgsregion*. Naturforschenden Gesell. Bern, Mitt., 31, 49-62.
- McGreevy J.P. (1981) - *Some perspectives on frost shattering*. Prog. Phys. Geog., 5(1), 56-75.
- McGreevy J.P. (1982) - *Some field and laboratory investigations of rock weathering, with particular reference to frost shattering and salt weathering*. PHD thesis, Queen's Univ. Belfast, 486 pp.
- McGreevy J.P. & Whalley W.B. (1982) - *The geomorphic significance of rock temperature variations in cold environments: a discussion*. Arctic Alp. Res., 14, 157-162.
- Mellor M. (1970) - *Phase composition of pore water in cold rocks*. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Res. Eng. Lab., rept. 292, 61 pp.
- Ollier C.D. (1969) - *Weathering*. Oliver and Boyd, Edinburgh, 304 pp.
- Ozouf J.C. (1983) - *Comparaison de gélifracsts naturels de grèzes charentaises et de gélifracsts fabriqués. Etude expérimentale et traitement statistique. Application des méthodes d'analyse des données*. Thèse 3e cycle, Univ. Caen, 185 pp.
- Pancza A. (1979) - *Contribution à l'étude des formations périglaciaires dans le Jura*. Thèse, Univ. Neuchatel, 187 pp.
- Peltier L.C. (1950) - *The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology*. Annals Ass. Amer. Geogr., 40, 214-236.
- Potts A.S. (1970) - *Frost action in rocks: some experimental data*. Trans. Inst. Brit. Geogr., 49, 109-124.
- Powers T.C. (1945) - *A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete*. J. Amer. Concrete Inst., 16, 245-272.
- Rapp A. (1960) - *Recent developments of mountain slopes in Kärkevagge and surroundings, northern Scandinavia*. Geogr. Annlr., 42, 65-200.
- RILEM (1980) - *Matériaux et constructions, essais et recherches*. Publ. 75, Dunod.
- Rossi D. (1962) - *Geologia della parte meridionale del Gruppo della Marmolada*. Mem. Mus. St. Nat. Ven. Trid., 14(1/B), 7-192.
- Russell R.J. (1943) - *Freeze-thaw frequencies in the United States*. Trans. Amer. Geophys. Union, 24, 125-133.
- Sacerdoti M. (1967) - *Cima Bocche-Valle S. Pellegrino*. In: Leonardi P. (1967), 621-625.
- Sacerdoti M. (1969) - *Le vulcaniti paleozoiche del fianco settentrionale della Valle di San Pellegrino (Moena, Trento)*. St. Trent. Sc. Nat., 46, 355-396.
- Soldati M. (1988) - *Metodologie analitiche per studi comparati sul crioclastismo. Un esempio: l'alta Valle di S. Pellegrino (Dolomiti)*. St. Trent. Sc. Nat.-Acta Geol., 65 (in corso di stampa).
- Taber S. (1929) - *Frost heaving*. J. Geol., 37, 428-461.
- Taber S. (1930) - *The mechanics of frost heaving*. J. Geol., 38, 303-317.
- Taber S. (1950) - *Intensive frost action along lake shores*. Amer. J. Sci., 248, 784-793.
- Thomson J. (1862) - *On the disintegration of stone exposed in buildings and otherwise to atmospheric influence*. Rept. 32nd Meeting Brit. Ass. Advanc. Sci., Notices and Abstracts, 35.
- Thorn C.E. (1979) - *Bedrock freeze-thaw weathering regime in an alpine environment, Colorado Front Range*. Earth Surf. Proces., 4, 211-228.
- Tourenq C. & Fourmaintraux D. (1974) - *L'indice de qualité des roches, quelques applications*. 2nd Int. Congr. Int. Ass. Eng. Geol., São Paulo, Brasil.
- Tricart J. (1956) - *Etude expérimentale du problème de la gélivation*. Biul. Peryglac., 4, 285-318.
- Tricart J. & Cailleux A. (1965) - *Introduction à la géomorphologie climatique*. SEDES, Paris, 306 pp.
- Tröll C. (1944) - *Strukturböden, Solifluktion und Frostklima der Erde*. Geol. Rundschau, 34, 545-694.
- Vardabasso S. (1930a) - *Studio geo-idrografico del bacino dell'Avisio (Valli di Fassa, Fiemme e Cembra)*.

- Uff. Idr. Mag. Acque, Sez. Geol., Padova, 97 pp.
- Vardabasso S. (1930b) - *Carta geologica del territorio eruttivo di Predazzo e Monzoni nelle Dolomiti di Fiemme e Fassa*. R. Scuola d'Ingegneria, Padova.
- Walder J.S. & Hallet B. (1986) - *The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective*. *Arctic Alp. Res.*, **18**(1), 27-32.
- Washburn A.L. (1979) - *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. Arnold, London, 406 pp.
- Whalley W.B., Douglas G.R. & McGreevy J.P. (1982) - *Crack propagation and associated weathering in igneous rocks*. *Z. Geomorph. N. F.*, **26**(1), 33-54.
- Wiman S. (1963) - *A preliminary study of experimental frost weathering*. *Geogr. Annlr.*, **45**, 113-121.

Accettato per la stampa il 28.4.1989