

IPOTESI DINAMICA SULLA FORMAZIONE DELLE GALLERIE DI SCORRIMENTO LAVICO

G.M. LICITRA - Gruppo Grotte Catania C.A.I. Sez. dell'Etna, Catania

Riassunto

L'argomento piú dibattuto e controverso, negli studi di Vulcanospeleologia, é quello riguardante la formazione delle gallerie di scorrimento lavico. Nell'ultimo ventennio il problema ha stimolato l'attenzione di numerosi studiosi, senza che tuttavia se ne riuscisse a trovare una soluzione abbastanza soddisfacente e di generale applicabilitá.

Infatti, molte delle teorie genetiche proposte tendono a generalizzare particolari situazioni osservate in singole grotte; oppure risolvono il problema in maniera troppo semplicistica, senza analizzarne attentamente i vari elementi.

Soltanto due teorie, invero geniali, avrebbero il pregio dell'applicabilitá generale: la teoria "del cannocchiale" di Poli-Rittman (basata sul concetto di "flusso laminare" di Rittman), e la teoria dalla "layered lava" di Ollier e Brown.

Ma sono anch'esse insoddisfacenti poiché estendono all'intero meccanismo genetico di una cavità un fenomeno la cui validitá é limitata nello spazio e nel tempo.

Per risolvere il problema é necessario considerare il tubo di lava come un sistema dinamico in continua evoluzione, durante il flusso attivo della lava, ed attraverso un attento studio comportamentale di detto flusso introdurre ed applicare i concetti di "curva di raffreddamento" e "compensazione termica", che possono appunto chiarire, essendo di generale applicabilitá, i meccanismi che regolano la formazione delle gallerie di scorrimento lavico.

Summary

The most controversial and discussed topic, in volcanospeleological studies, is the one concerning lava tube cave genesis. This problem largely attracted the attention of many scholars in the last two decades, but a solution enough satisfying and generally applicable is not yet at hand.

In fact many genetic theories are affected by a trend to generalize particular situations observed in single caves. Others give a too simplistic explanation of the problem, without a careful analysis of its components.

Only two really ingenious theories could be generally applicable: the "telescope" theory by Poli-Rittmann (based on Rittmann's "laminar flow" principle), and the "layered lava" theory by Ollier and Brown.

But they are unsatisfying as well, as in these theories a phenomenon operating in a given moment and place is considered, and then it is broadened and applied to the whole genetic mechanism.

For a correct solution of the genetic problem one should consider a lava tube as a dynamic system in continuous evolution, during the active lava flow. It is therefore advisable to carry out a careful study on the behaviour of active lava flows by introducing the concepts of "cooling curve" and "thermal compensation". In fact these concepts can make clear the mechanism governing lava tube cave formation, through their general applicability.

INTRODUZIONE

Tra le diverse problematiche poste dalla Vulcanospeleologia, la piú sentita é senza dubbio quella riguardante la formazione delle gallerie di scorrimento lavico: infatti é evidente che determinati meccanismi hanno operato durante il flusso attivo della lava, per condurre alla formazione della galleria, cosí come essa si presenta agli occhi dello speleologo. Ma data l'impossibilitá - finora - di indagine diretta, sia pure strumentale, all'interno di un tubo di lava attivo, si é costretti a rimanere nel campo delle ipotesi.

Lo studio di gallerie di scorrimento lavico e di colate laviche in movimento ha indotto numerosi studiosi, specie nell'ultimo ventennio, a proporre diverse teorie genetiche, a volte molto simili, altre volte anche in apparente contrasto tra loro. Ma per diversi motivi nessuna di esse, fino ad oggi, é riuscita a riscuotere l'unanimitá dei consensi fornendo un'ipotesi sufficientemente valida e generalmente accettata dei meccanismi che intervengono nella formazione di questo tipo di cavitá.

ANALISI CRITICA DELLE ATTUALI TEORIE GENETICHE

Un panorama delle principali teorie sulla formazione delle gallerie reogenetiche é stato giá presentato dallo scrivente nell'Appendice IV degli "Atti della Settimana Speleologica Catanese" (II Symposium Internazionale di Vulcanospeleologia, Catania, 24-30 Agosto 1975).

Il prospetto nella pagina che segue riporta una sintesi delle teorie speleogenetiche descritte nel lavoro richiamato, al quale si rinviano gli interessati per una piú approfondita conoscenza dell'argomento.

Vanno tuttavia messi in evidenza i motivi per i quali tali teorie non sono atte a fornire una soddisfacente ipotesi di meccanismo genetico per le cavitá di scorrimento lavico.

Le critiche mosse dallo scrivente alle teorie genetiche sono le seguenti:

a - Teorie basate sull'osservazione e lo studio di cavitá esistenti.

Queste teorie, perfettamente atte a spiegare i meccanismi genetici della cavitá sulla quale sono state elaborate, raramente trovano riscontro se applicate allo studio di un'altra galleria di scorrimento, persino nella stessa area vulcanica. Infatti ogni galleria ha una sua propria identitá morfogenetica, determinata dai fattori speleogenetici elencati da WOOD (1977), e questi fattori possono variare da una grotta a un'altra e da un'eruzione a un'altra, anche sullo stesso vulcano.

b - Teorie basate sull'osservazione e lo studio di flussi lavici in movimento.

Queste teorie sono state enunciate da KJARTANSSON (1949, citato da Wood, 1971), che ha studiato in Islanda un flusso lavico dell'Hekla, e da vari studiosi che hanno seguito i flussi lavici del Kilauea tra il 1969 e il 1974. Seppure i dati raccolti ed elaborati hanno aggiunto una notevole massa di conoscenze dirette alle conoscenze teoriche giá acquisite, l'applicabilitá delle teorie elaborate sulla scorta di queste osservazioni é ancora piú limitata, in quanto é nota l'estrema fluiditá delle lave islandesi e ancor piú di quelle hawaiane, e pertanto il loro comportamento é del tutto eccezionale, rispetto al comportamento degli efflussi lavici osservabili in ogni altra parte della Terra.

Ne é riprova il convincimento generale che le gallerie di scorrimento si formino soltanto in lave **pahoehoe**, mentre quasi tutte le gallerie esistenti sull'Etna sono formate in lave **aa**.

c - Ipotesi di lavoro non riferite ad una determinata cavitá.

Si tratta in particolare di due teorie. La prima é la cosiddetta "teoria del cannocchiale", enunciata da POLI (1959) e ripresa da RITTMANN (1977), basata

PROSPETTO DELLE TEORIE SULLA FORMAZIONE DELLE GALLERIE DI SCORRIMENTO

AUTORE	ANNO	TEORIA
HARTWIG, G.	1892	Formazione di croste sulla lava in movimento. Svuotamento del condotto, che lascia un tubo vuoto.
NICHOLS, R. L.	1936	Concetto di "unita' di flusso", che alla fine si svuotano per drenaggio della lava liquida.
SKEATS e JAMES	1937	Coalescenza di unita' di flusso o di tubi primari, con successiva asportazione dei setti di separazione e formazione di gallerie piú ampie.
KJARTANSSON	1949	Formazione progressiva di croste che galleggiano sulla superficie del flusso lavico, e contemporaneo sviluppo di croste dagli argini verso il centro del flusso; drenaggio finale.
WENTWORTH e MACDONALD	1953	a) Chiusura dei canali di lava in seguito alla formazione di croste, con drenaggio finale della lava ancora fluida; b) Fuoriuscita di lava liquida da lingue di lava esternamente solidificate.
POLI, E.	1959	Ipotesi del cannocchiale: il nucleo liquido di una colata lavica in movimento é costituito da lamine cilindriche concentriche, la cui velocita' aumenta dalla periferia verso il centro. Il drenaggio finale procede dalla parte piú interna verso la periferia.
OLLIER e BROWN	1965	Al di sotto della parte piú esterna, solida, il flusso é suddiviso in due fasi: cilindri di lava virtualmente liquida fluiscono in tubi immersi in una pila di strati di lava virtualmente solida. Il drenaggio finale produce gallerie di scorrimento immerse nella roccia lavica a strati.
MACDONALD, G.	1970	Formazione della crosta su un flusso lavico; il movimento viene gradualmente confinato in ambienti ad andamento tubolare; drenaggio finale.
KERMODE, L.	1970	Formazione di crosta su un canale aperto; ingrossamento degli argini per successivi trabocchi laterali. Drenaggio finale del condotto, immerso in una serie di strati di lava.
GREELEY e HYDE	1971	La lava in movimento inizia a raffreddarsi dalla periferia verso l'interno. Il nucleo fluido si muove in condotti tubolari vaganti in seno ad una massa estremamente viscosa. Sulle pendenze piú accentuate é possibile che il flusso sia turbolento, provocando l'accrescimento degli argini, che finiscono per congiungersi, mediante l'accumulo di spruzzi e brandelli di lava fusa.
WOOD, C.	1971	Sovrapposizione di unita' di flusso; i loro nuclei liquidi fluiscono in tubi primari. Questi tubi convergono in tubi piú ampi (tubi secondari), in seguito alla rifusione e all'erosione dei setti di separazione.
PETERSON e SWANSON	1974	a) Le gallerie con la volta piatta si formano in quattro modi differenti: 1. Croste che si estendono verso valle a partire dalla bocca effusiva; 2. Croste che si estendono controcorrente a partire da un punto di sifonamento della lava fluida; 3. Croste che si estendono dalle pareti del canale verso il filo della corrente; 4. Lastroni di crosta galleggiante che si saldano tra loro e finiscono per ancorarsi alle pareti del canale. b) Le gallerie con volta arcuata si formano per drenaggio delle lingue di lava pahoehoe.

sull'applicazione dell'ipotesi di RITTMANN, del flusso laminare nelle lave, allo studio di numerose gallerie dell'Etna. La seconda é la "teoria della layered lava", elaborata da OLLIER e BROWN (1965) in seguito allo studio sistematico delle gallerie di scorrimento del Victoria (Australia).

Entrambe queste teorie, essendo enunciate come ipotesi di lavoro, potrebbero essere applicate a qualunque galleria di scorrimento lavico, anche perché ipotizzano in maniera abbastanza soddisfacente il tipo di movimento della lava all'interno di un tubo.

Esse sono tuttavia limitate dal fatto che sono riferite ad un'azione ben circoscritta nello spazio e nel tempo, come se venisse "fotografato" un determinato momento del meccanismo speleogenetico. Anche in questo caso, quindi, ci troviamo di fronte ad una dilatazione arbitraria di azione ed effetti, come se questi fossero costanti ed invariabili in qualunque punto della colata, durante la sua fase attiva.

IPOTESI DINAMICA

Restando sempre nel campo delle ipotesi di lavoro, é necessario considerare il tubo di lava, nella sua fase attiva, come un sistema dinamico in continua evoluzione. Pertanto é lecito supporre che nello stesso istante, ma in punti differenti del tubo, possono agire differenti meccanismi, così come possono essere differenti i meccanismi che agiscono nello stesso punto ma in tempi diversi.

Partendo dal presupposto che le lave fluiscono con moto esclusivamente laminare (RITTMANN, 1977), é possibile formulare un'ipotesi dinamica sulla genesi delle gallerie di scorrimento, basata sulla costruzione della **curva di raffreddamento** di un flusso lavico ideale.

Dispersione del calore in un flusso lavico

Le lave basiche, nelle quali in determinate condizioni possono formarsi le cavità reogenetiche superficiali (LICITRA 1981, 1982b), affiorano in superficie a temperature normalmente comprese tra i 1100 e i 1200 C, allo stato fluido, e quindi in condizione di scorrere su un pendio anche molto debole. Esse si mantengono in queste condizioni finché la loro temperatura non scende al di sotto di circa 1000 °C (*) (soglia di immobilizzazione), quando la viscosità raggiunge valori tali da impedire ogni ulteriore movimento. L'abbassamento della temperatura é però estremamente lento, anche nelle condizioni più sfavorevoli (colate laviche subacquee e subglaciali), poiché la laminarità del flusso impedisce la dispersione del calore per convezione (che dovrebbe avvenire mediante la traslazione fisica di particelle di lava tra lamine contigue; ciò é ammissibile in un moto turbolento, ma in antitesi con i principi del moto laminare), e limita alle lamine più esterne la dispersione di calore per irraggiamento nell'aria. Inoltre la dispersione del calore per conduzione, che é già trascurabile per la bassissima conducibilità specifica della lava (circa 0,005 cal. cmq/sec - RITTMANN, 1977), é tanto più insignificante quanto maggiore é la velocità del flusso, poiché diminuisce il tempo in cui una particella a temperatura T_x rimane a contatto con un'altra particella a temperatura T_{x-n} , cioè in condizione di cedere una quantità Q_x del suo calore.

Ne consegue che la lava si raffredda prevalentemente per irraggiamento, in quelle zone in cui lo scorrimento del fluido avviene "a pelo libero" (scorrimento gravitativo), mentre in un flusso lavico all'interno di un tubo, dove lo scorrimento avviene generalmente a pressione idrostatica, il raffreddamento - trascurabile - avviene prevalentemente per conduzione.

(*) Si tratta di un valore medio e comunque arbitrario, dipendente oltre che dalle caratteristiche chimico-fisiche della lava, anche da fattori esterni come topografia, pendenza, ecc.

Curva di raffreddamento

Si immagini di avere un flusso lavico nel quale siano soddisfatte le condizioni ideali di chimismo, fluidità, velocità, ecc., e in un diagramma cartesiano si riportino in ordinata le temperature T_x misurate a distanze D crescenti dalla bocca effusiva in un medesimo istante x_i . Il grafico che se ne ricava sarà rappresentato da una curva di tipo esponenziale (Fig.1) espressa dalla formula

$$T_x = \frac{(T - T_f) \cdot e^{-\frac{K D}{\eta}} + T_f}{m \cdot \left(\frac{K \eta}{\varphi} \right)}$$

dove:

T = temperatura della lava alla bocca effusiva;

T_f = temperatura della lava al fronte della colata;

k = conducibilità specifica della lava (circa 0,005 cal x cmq./sec.);

D = distanza dalla bocca effusiva del punto in cui si misura T_x

η = viscosità media della lava secondo la formula di Both e Self

$$\eta = \frac{ggh^2 \cdot \sin \alpha}{nV} \quad (*)$$

φ = fattore di frizione di Darcy

$$\varphi = \frac{8ggh \cdot \sin \alpha}{V^2}$$

m = fattore di correzione della compensazione termica (non costante) ≤ 1 , che occorre introdurre per valori di $D \geq 5000$.

n = numero adimensionale di Reynolds.

 (*) RITTMANN, 1977, pag.90

ρ = densità media della lava.

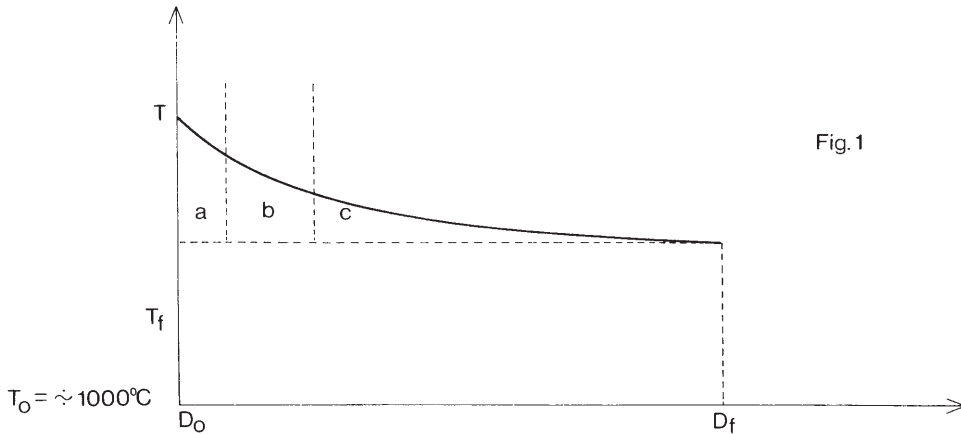


Fig.1

Tale curva é divisa in tre sezioni arbitrarie, che corrispondono alle "zone" di una colata descritte da RITTMANN (1977, pag.93, fig.3).

Nella sezione **a**, caratterizzata da un'apprezzabile diminuzione del valore di T , si ha la zona dell'irraggiamento. Lo scorrimento della lava é di tipo gravitativo e le lamine del fluido si muovono parallele tra loro, una sull'altra, a velocità differenti; la velocità raggiunge i valori piú elevati nella parte mediana del flusso.

Nella sezione **b**, dove si attenua la pendenza della curva perché diminuisce la dispersione di calore per irraggiamento, si ha la zona di transizione o **zona di compensazione termica**. Qui infatti la maggiore dispersione di calore iniziale viene compensata dal continuo afflusso di nuova lava a temperatura piú elevata, mentre la crosta che si va formando sopra la massa fluida frena sempre di piú la dispersione del calore per irraggiamento. In questa zona gli effetti dello scorrimento gravitativo e di quello a pressione idrostatica si equivalgono, e il movimento della lava avviene presumibilmente secondo il meccanismo ipotizzato da OLLIER e BROWN (1965 - "cilindri di lava virtualmente liquida che scorrono dentro tubi immersi in una massa di lava a strati, virtualmente solida").

La sezione **c**, dove la pendenza della curva é diventata trascurabile e costante, corrisponde alla zona in cui la lava fluisce all'interno del suo tubo, spinta dalla pressione idrostatica (zona di flusso a pressione); qui la dispersione del calore, realizzabile quasi esclusivamente per conduzione, diventa impercettibile, ed il movimento della lava avviene a lamine cilindriche concentriche, secondo l'ipotesi formulata da POLI (1959) e RITTMANN (1977).

Flessione dinamica della curva di raffreddamento

La curva sopra descritta rappresenta tuttavia una situazione ideale, poiché presuppone la distanza D come unico fattore variabile del sistema; nella realtà la situazione é molto piú complessa, non soltanto perché la curva ottenuta si riferisce esclusivamente al raffreddamento in un determinato istante i del flusso, ma anche e soprattutto perché essa é complicata da una brusca flessione della temperatura nel punto D_f (Fig.2).

Qui infatti, in corrispondenza del fronte della colata, avviene la continua emissione di **unità di flusso**, sotto la spinta della pressione idrostatica esercitata dal tubo di lava fluida. Ciò provoca un immediato ritorno alle condizioni di scorrimento gravitativo, con conseguente apprezzabile dispersione di calore per irraggiamento.

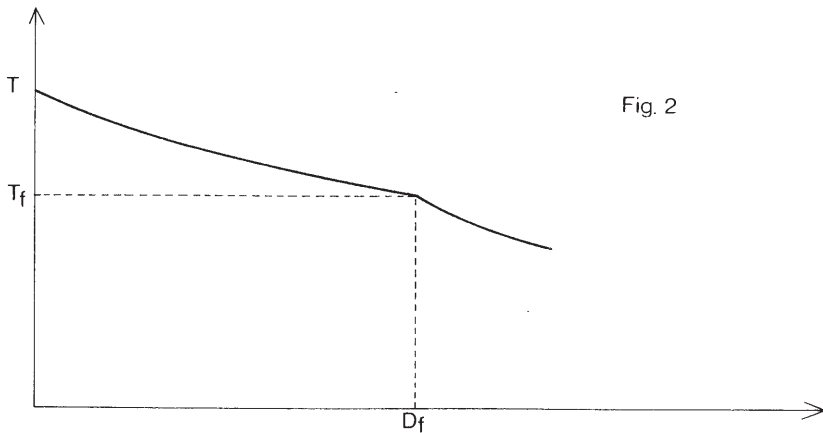


Fig. 2

Inoltre, il passaggio dalle condizioni di scorrimento a pressione a quelle di scorrimento gravitativo, con relativa flessione della curva di raffreddamento, si ripercuote su tutta la curva (Fig.3): da una parte la flessione riscontrata in D_f tende a spostarsi nel senso del valore crescente di D (D_{f+1} , D_{f+2} , ..., D_{f+n}), di pari passo con l'emissione di nuove unità di flusso, con l'avanzamento della colata e l'allungamento del tubo, all'interno del quale la momentanea dispersione di calore sarebbe subito compensata dal continuo afflusso di lava più calda (condizioni di **compensazione termica**); però la flessione della

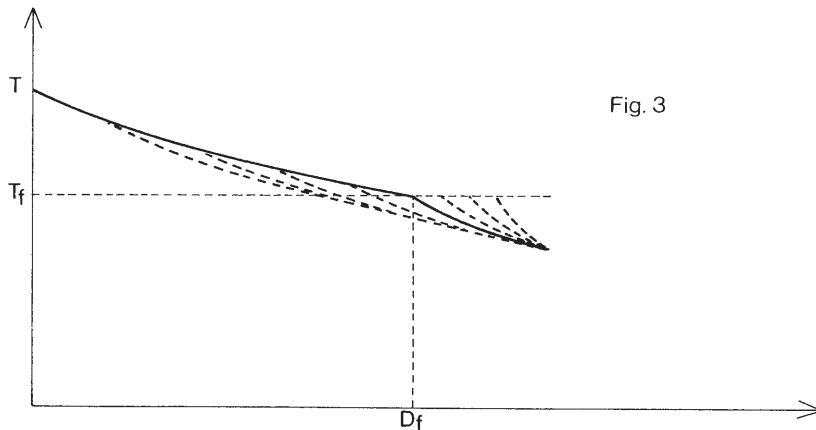


Fig. 3

temperatura si ripercuote anche verso monte, poiché l'emissione di unità di flusso dal fronte della colata provoca un parziale svuotamento all'interno del tubo; anche qui, pertanto, si ha un ritorno allo scorrimento gravitativo, con conseguente dispersione di calore per irraggiamento. Il continuo ripetersi del fenomeno si traduce in pratica in un generale e progressivo abbassamento della temperatura del sistema, la cui curva di raffreddamento tende a raggiungere, nella parte terminale, valori sempre più prossimi alla soglia di immobilizzazione. Questa situazione è ulteriormente accentuata dal fatto che i livelli di scorrimento, all'interno dei tubi, tendono sempre a decrescere, sia per possibili riduzioni della portata, sia in particolare per l'azione erosiva esercitata dal peso, dalla temperatura e dal carico solido del fluido sul suo letto di scorrimento, come si è potuto verificare nella recente eruzione dell'Etna.

In queste condizioni, anche all'interno del tubo, si stabilisce uno scorrimento di tipo gravitativo, e la superficie del flusso tende a raffreddarsi per irraggiamento. Come conseguenza la superficie del flusso tende a ricoprirsi di una crosta solida, con formazione di un nuovo tubo all'interno del precedente, fino al ristabilirsi delle condizioni di scorrimento a pressione idrostatica. Va notato che le reazioni esotermiche tra gas vulcanici e ossigeno atmosferico, che possono verificarsi all'interno dei tubi, sono fenomeni localizzati, e non influiscono sul processo di raffreddamento complessivo, che è invece in stretto rapporto con il tipo di scorrimento e con la compensazione termica.

All'irraggiamento interno va in particolare attribuita la formazione delle lunghe mensole laterali che spesso caratterizzano la morfologia interna delle gallerie reogenetiche, sebbene Wood, nel suo studio sulla Raufarhólshellir (1971), ha interpretato queste mensole come conseguenza della confluenza di due tubi primari sovrapposti in un unico tubo secondario di maggiori dimensioni.

Un'ulteriore riprova che la lava tende a ricoprirsi di una crosta solida ovunque si abbia uno scorrimento di tipo gravitativo, anche all'interno delle gallerie reogenetiche, è data dalla morfologia del pavimento di dette gallerie, che presenta sempre caratteristiche morfologiche molto simili a quelle della superficie esterna di un flusso di lava solidificato. Infatti il pavimento di ogni cavità reogenetica non è altro che la superficie dell'ultima corrente di lava che la percorreva, nel momento in cui la sua temperatura ha raggiunto la soglia di immobilizzazione.

SVUOTAMENTO DELLE GALLERIE REOGENETICHE

Le gallerie di scorrimento sono generate, come è risaputo, dallo svuotamento dei tubi di lava. Tale svuotamento avviene però principalmente per progressivo abbassamento del livello del flusso all'interno del tubo durante la sua attività, piuttosto che per drenaggio del tubo verso valle dopo il cessare dell'alimentazione per arresto dell'attività effusiva. Infatti sarebbe estremamente problematico spiegare con la semplicistica teoria del drenaggio la genesi di lunghe cavità come la Raufarhólshellir (Islanda) o la Ape Cave (Washington, USA) o la Kazumura Cave (Hawaii), specie se si tiene conto che il dislivello tra le due estremità di dette grotte è del tutto irrilevante rispetto al loro sviluppo lineare.

Bisogna invece ritenere, come già ipotizzato da FINCH (1943), che il fluido che scorre all'interno del tubo eserciti una certa azione erosiva a carico del suo letto di scorrimento, determinando in tal modo un abbassamento del livello all'interno del tubo. Ciò è stato anche osservato ad Hawaii da PETERSON e SWANSON (1974), i quali hanno potuto seguire il progressivo abbassamento del livello di scorrimento all'interno dei tubi attivi, senza che parallelamente intervenissero apprezzabili diminuzioni nella portata del flusso medesimo.

L'arresto del movimento del flusso all'interno di un tubo va dunque imputato non al suo svuotamento per drenaggio, ma alle conseguenze della flessione della curva di raffreddamento e del progressivo abbassamento delle due zone di compensazione termica (nella zona iniziale e nella zona del fronte): come si è visto in precedenza, la somma di queste conseguenze provoca il progressivo abbassamento della temperatura di tutto il sistema, fino ad incontrare la soglia di immobilizzazione, al di sotto della quale si ha l'arresto del movimento.

Va tenuto presente che la curva di raffreddamento può toccare la soglia di immobilizzazione ($T \leq 1000^\circ\text{C}$) in un qualunque punto D_n compreso tra D_0 e D_f . Questo spiega come spesso si trovino gallerie reogenetiche senza che vi sia traccia di una bocca effusiva nel loro punto iniziale o nelle sue immediate vicinanze.

CONCLUSIONI

In base alle considerazioni sopra riportate si può dunque affermare che il movimento della lava all'interno dei tubi avviene, con moto laminare, secondo l'ipotesi di OLLIER e BROWN in quelle parti della colata interessate da flusso gravitazionale, mentre avviene a lamine cilindriche concentriche, come ipotizzato da POLI (1959) e da RITTMANN (1977), nei tubi in cui il fluido riempie interamente la sua guaina solida, scorrendo a pressione idrostatica. I due tipi di scorrimento tendono però costantemente a sostituirsi l'uno all'altro, poiché ogni emissione di una nuova unità di flusso tende a svuotare parzialmente il tubo pieno, favorendo il passaggio dallo scorrimento a pressione a quello gravitativo, mentre dovunque si ha circolazione gravitativa la superficie del flusso tende a ricoprirsi con una crosta solida che racchiude il

fluido in un nuovo tubo a pressione idrostatica.

Il drenaggio dei tubi avviene durante la fase attiva del flusso, e non quando cessa l'alimentazione. Esso é imputabile al progressivo abbassamento del livello del fluido all'interno dei tubi sia per parziale diminuzione della portata, sia per azione erosiva a carico delle pareti e del letto di scorrimento della lava fluida.

E' comunque chiaro che, essendo numerosi, estremamente variabili e variamente interconnessi tra loro i fattori che intervengono nella formazione di una cavità reogenetica, il numero delle combinazioni e dei morfotipi risultanti é praticamente illimitato. Pertanto ogni singola cavità é unica nel suo genere e, prescindendo da qualsiasi ipotesi di lavoro, i meccanismi genetici specifici possono essere individuati soltanto attraverso un'attenta interpretazione dei dati sperimentali rilevati sul terreno.

RINGRAZIAMENTI

L'Autore desidera ringraziare i Proff. Marcinnó, Pitrone e Sperlinga per i suggerimenti forniti durante l'elaborazione della formula della curva di raffreddamento. E' grato altresí ai Dott.ri Pandolfo e Puglisi per gli utili scambi di idee avuti con loro durante l'elaborazione del lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- FINCH R.H. (1943): Lava Rivers and Their Channels. The Volc. Lett., Hawaii, 480 (1-2).
- GREELEY R. (1971): Observations of actively forming lava tubes and associated structures, Hawaii. Mod. Geol., 2 (207-223).
- GREELEY R., HYDE J.H. (1971): Lava Tubes of The Cave Basalt, Mount St.Helens, Washington. Geol. Soc. of Amer. Bull., Vol.83 (2397-2418).
- LICITRA G.M. (1977): Le grotte di scorrimento lavico; cenni sulle teorie genetiche. Atti Sett. Spel. Cat., 1975. G.G.C.-CAI/Etna, Catania (249-261).
- LICITRA G.M. (1981): Grotte vulcaniche: le cavità reogenetiche superficiali. Speleoetna, Boll. del G.G.C.-CAI/Etna, Catania, N.2 (20-24).
- LICITRA G.M. (1982/b): Essay on genetic classification of volcanic caves. III Int. Symp. on Volcanospel., Bend, Or., 1982. In corso di stampa.
- NICHOLS R.L. (1936): Flow Units in Basalt. Journ. Geol., 44 (617-630).
- OLLIER C.D., BROWN M.C. (1965): Lava Caves of Victoria. Bull. Volc., 28, Naples (215-229).
- PETERSON D.W., SWANSON D.A. (1974): Observed formation of lava tubes during 1970/71 at Kilauea volcano, Hawaii. Studies in Speleology; W.P.C.S. Trust Ltd., London, vol.2, part 6 (209-222). Vedi anche: Atti Sem. Gr. Lav., Catania, 1975, pubbl. 1977, G.G.C.-CAI/Etna, Catania.
- POLI E. (1959/b): Genesi e morfologia di alcune grotte dell'Etna. Boll. Soc. Geogr. Ital., Roma, 8, 12 (452-463).
- RITTAMANN A. (1977): Formazione delle grotte vulcaniche. Atti Semin. Gr. Lav., Catania, 1975. G.G.C.-CAI/Etna, Catania (87-100).
- WOOD C. (1971): The nature and origin of Raufarhólshellir. Trans. C.R.G. of GB, 13, 4 (245-256).
- WOOD C. (1977): Factors contributing to the genesis of caves in lava. Semin. Gr. Lav., Catania, 1975. G.G.C.-CAI/Etna, Catania (101-113).