

CAPITOLO 2
IL METAMORFISMO DELLA NEVE

2.1 – INTRODUZIONE

La neve è data da un insieme di cristalli di ghiaccio. Benché si asserisca che nessun cristallo di neve sia identico ad un altro, in tutti è riconoscibile una simmetria esagonale. La struttura dei cristalli di neve varia con la concentrazione di vapore acqueo e con la temperatura, mentre le dimensioni dei cristalli dipendono dalla disponibilità di vapore acqueo e dall'efficienza delle collisioni fra i diversi nuclei che avvengono all'interno delle nubi, oppure dai moti turbolenti nella fase di ascesa.

Appena la neve si accumula al suolo, comincia un processo di metamorfismo che continua fino a quando la fusione non è completata, con un insieme di trasformazioni dovute alle variazioni di calore, di pressione e a reazioni chimiche.

La fusione di uno strato di neve comincia quando l'apporto netto di energia termica, ovvero la risultante del bilancio tra la radiazione netta e dei flussi di calore turbolenti e conduttivi, diventa positivo. Essa può pensarsi separata in tre fasi: nella prima fase, di riscaldamento, il valore medio della temperatura all'interno del volume di neve aumenta più o meno stabilmente fino alla temperatura di fusione ($T=0^{\circ}\text{C}$); nella seconda fase, di saturazione, che comincia quando lo strato di neve diventa isoterma, avviene la fusione della neve senza la perdita dell'acqua disciolta in essa, trattenuta nei pori dalle forze di tensione superficiale. A questo punto nella terza fase, di vera e propria fusione, apporti di energia supplementari producono un'ulteriore transizione allo stato liquido della neve.

2.2 – LA NEVE NELL’ATMOSFERA

La formazione di un cristallo di neve è il risultato di un processo complesso nel quale si possono distinguere due fasi:

?? Formazione di un nocciolo iniziale chiamato “germe”

?? Crescita del cristallo di neve su questo “germe” attraverso la condensazione solida del vapore acqueo.

Questo meccanismo di formazione e di crescita di un cristallo di neve è legato al fatto che nell’atmosfera libera si incontrano frequentemente due stati instabili:

?? La sopraffusione

?? La soprasaturazione

La grandissima varietà di forme dei cristalli di neve fresca si spiegherebbe con le condizioni di temperatura e di concentrazione del vapore acqueo (umidità) che accompagnano la fase di “crescita” di questi cristalli.

Nel corso dei suoi movimenti all’interno della massa di nubi, un cristallo può incontrare e captare delle piccole gocce d’acqua sopraffusa che si congelano al suo contatto, dando un aspetto granuloso alla superficie. Se il fenomeno è limitato, i cristalli rimangono riconoscibili e traslucidi (cristalli parzialmente o interamente brinati). Nel caso invece in cui l’instabilità nelle nubi sia forte, si può produrre un’intensa formazione di ghiaccio in tutte le direzioni intorno al cristallo. La neve si presenta allora sotto forma di grani più o meno sferici, bianchi e opachi, la cui consistenza è simile a quella della brina (neve pallottolare).

Con il vento forte, i cristalli si scontrano, si sbriciolano e arrivano al suolo sotto forma di frammenti difficilmente identificabili. In questo caso la neve è chiamata

“neve ventata”. Magono e Lee nella loro pubblicazione “Meteorological classification of natural snow cristal” (1966) danno una descrizione molto completa dei cristalli di neve fresca, con circa 80 tipi diversi classificati.

L’organizzazione Meteorologica Mondiale ha adottato una classificazione molto più semplice che distingue 8 tipi diversi di cristalli di neve, e 2 tipi di grani di ghiaccio (pioggia gelata o grandine). Ognuna di queste classi racchiude evidentemente una grandissima varietà di forme.






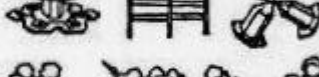



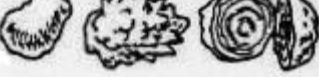
	<i>Tipi</i>	<i>Forme relative</i>
1	Neve a piastre	
2	Dendriti stellari	
3	Colonne	
4	Aghi	
5	Dendriti sferiche	
6	Colonne fra 2 piastre	
7	Particelle irregolari	
8	Neve pallottolare	
A	Grani di ghiaccio (pioggia gelata)	
B	Grandine	

Tabella 2.2.1 ? classificazione dei cristalli di neve fresca secondo l’Organizzazione Mondiale della Meteorologia (O.M.M.) (Adattato da figura reperita nel sito internet www.anpnc.com)

2.3 – ANALISI DEL MANTO NEVOSO AL SUOLO

Esaminando una sezione realizzata in un manto nevoso, si nota che è costituito da un ammasso di strati di neve dalle caratteristiche fisiche e meccaniche differenti. Ogni strato si è costituito nel corso di una precipitazione nevosa e nelle condizioni meteorologiche del momento della caduta, così come quelle successive gli hanno conferito le sue caratteristiche. Questi strati continueranno, tuttavia, a evolversi fino allo scioglimento finale. Oltre alle condizioni meteorologiche propriamente dette, l'esposizione topografica ha un ruolo molto importante, poiché può fortemente influenzare l'effetto degli eventi meteorologici. Il manto nevoso è dunque un materiale eterogeneo. Le caratteristiche fisiche e meccaniche dipendono in gran parte dai tipi di cristalli di neve che la compongono. Osservando la neve fresca che si deposita, si assiste a delle trasformazioni dei cristalli iniziali, influenzati dagli effetti termodinamici e meccanici. Queste trasformazioni, chiamate metamorfismi, porteranno dalla neve fresca allo scioglimento, attraverso una continua evoluzione. Le fasi di transizione sono caratterizzate da combinazioni di cristalli o grani di neve a stadi di evoluzione differenti.

La neve è un materiale poroso la cui temperatura è sempre inferiore, o al più uguale, a 0°C. La neve è detta asciutta quando è formata da un miscuglio di aria e di ghiaccio a temperatura negativa. Tuttavia, l'aria contiene del vapore acqueo e l'acqua è presente nelle sue due fasi gassosa e solida. Quando si ha la presenza di acqua liquida nella neve, le tre fasi dell'acqua sono in equilibrio termodinamico e ciò si traduce in una temperatura di 0°C. Quando la neve è asciutta, i metamorfismi dei grani di neve si formano con la fase del vapore, mentre nel caso

della neve umida, esse si costituiscono essenzialmente con la fase liquida, essendo la fase gassosa generalmente abbastanza ridotta. E' la ragione per la quale noi distingueremo due tipi di metamorfismi: il metamorfismo della neve asciutta e quello della neve umida. Oltre a queste trasformazioni termodinamiche, i cristalli di neve possono subire delle trasformazioni legate a dei fattori meccanici dovuti al vento, o al peso degli strati di neve superiori, quando essi sono sepolti. Esistono quindi, numerosi fattori o motori dei metamorfismi. Alcuni sono relativi soltanto alla neve asciutta. Nel caso di neve umida, la presenza di acqua liquida associata ad una isoterma a 0°C diminuisce o impedisce la loro azione, e sono altri agenti che intervengono nel modificare la struttura dei cristalli di neve.

2.4 – LA NEVE ASCIUTTA

2.4.1 – IL METAMORFISMO DELLA NEVE ASCIUTTA

In assenza di acqua liquida, le trasformazioni della neve sono dovute sia a degli effetti meccanici e sia a dei fenomeni termodinamici, in cui intervengono solo due fasi dell'acqua, solida o gassosa.

≪≪ L'effetto del raggio di curvatura

L'aria non può contenere che una quantità limitata di vapore acqueo (tensione del vapore a saturazione) dal momento che questo limite dipende solo dalla temperatura secondo l'equazione $e_s = f(T)$. Nella vicinanza di una superficie di acqua liquida o di ghiaccio, questa quantità massima dipende anche dalla forma di questa superficie .

Il raggio di curvatura di una superficie ne caratterizza la sua forma. Le forme

convesse (punte, gobbe) hanno piccoli raggi di curvatura, la forma piana ha un raggio di curvatura infinito e le forme concave (incavato) hanno dei raggi di curvatura negativi e delle pressioni di vapore saturo i cui valori assoluti sono tanto più piccoli quanto gli incavi sono più pronunciati. Ad una data temperatura, la tensione massima del vapore saturo è più elevata nelle vicinanze delle convessità che a contatto delle superfici piane e concave. Si osserva dunque, globalmente, più vapore d'acqua presso gobbe che incavi. Questo disequilibrio non può persistere e si stabilisce un flusso di vapore dalle zone convesse verso le zone concave. Le zone vicine alle convessità si trovano, allora, in sottosaturazione, provocando la sublimazione di una parte della forma convessa del ghiaccio (passaggio dello stato di ghiaccio allo stato di vapore acqueo). Al contrario, le zone vicine alle zone concave sono in stato di sovraturazione e ne risulta una condensazione solida del vapore d'acqua più alta nelle concavità (passaggio dello stato di vapore d'acqua allo stato di ghiaccio). La diffusione di vapore d'acqua dalle zone di forte convessità verso le zone di bassa concentrazione (concavità) produce il fenomeno che porta ad un ammorbidimento dei contorni, alla scomparsa dei grani più piccoli e ad un arrotondamento dei cristalli nell'arco di un tempo abbastanza lungo.

Si constata che c'è un trasferimento di massa dalle parti convesse verso le parti concave per mezzo della fase vapore .

Una conseguenza importante dell'effetto del raggio di curvatura è la coesione di sinterizzazione. Quando due grani di neve, che noi supporremo sferici per semplificare la dimostrazione, sono in contatto, la zona di contatto forma una concavità.

Il vapore acqueo ha dunque la tendenza a condensarsi intorno al punto di contatto, creando in questo modo un ponte di ghiaccio fra i due grani .

Si dice allora che c'è coesione di sinterizzazione fra i due grani. La rapidità di formazione e l'importanza dei ponti di ghiaccio sono tanto più grandi quanto più i grani di neve sono piccoli. Ogni volta che c'è un contatto fra i grani di neve, poiché maggiori sono le differenze tra i raggi di curvatura delle convessità e delle concavità e quindi i gradienti di pressione, si forma un ponte di ghiaccio, dando alla neve una certa coesione la cui qualità dipende dal numero dei ponti di ghiaccio. Le nevi asciutte costituite da piccoli grani (<0,3/0,4mm) avranno dunque una buona coesione di sinterizzazione, mentre quelle costituite da grani più grossi avranno una debole coesione di sinterizzazione.

Le caratteristiche fisiche e meccaniche di uno strato di neve dipendono in gran parte dai tipi di cristalli che la compongono.

≡≡ Il gradiente verticale di temperatura

Il gradiente di temperatura di uno strato di neve caratterizza la ripartizione verticale della temperatura in questo strato.

In generale, la base del manto nevoso è a una temperatura prossima agli 0°C, mentre in superficie, quando la neve è asciutta, la temperatura può essere abbastanza bassa con dei valori compresi alcune volte tra i -20°C e i -30°C .

Il gradiente verticale di temperatura è espresso dal rapporto fra la differenza fra i due livelli e la distanza verticale che li separa (Figura 2.4.1.1)

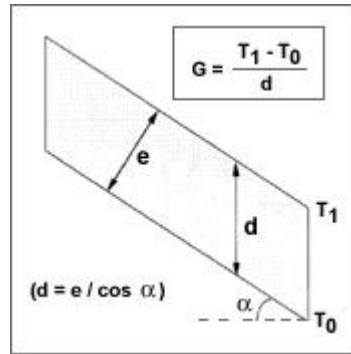


Figura 2.4.1.1 ? Calcolo del gradiente verticale di temperatura (fonte: L. Liboutry: *Traité de Glaciologie*, Vol. 1 : *Glace et neige*. Vol. 2 : *Glaciers- variation du climat-sols gelés*).

Il gradiente è legato alla qualità d'isolante della neve, funzione della quantità d'aria che essa contiene, e dunque della sua massa volumica; è maggiore per la neve meno densa.

Dunque in generale negli strati di superficie, generalmente costituiti da neve recente e poco densa, si potranno incontrare forti gradienti mentre, più in profondità, essendo le nevi più dense, saranno meno importanti.

Allorché uno strato di neve è umido, la presenza d'acqua liquida implica una temperatura uniforme di 0°C , e di conseguenza un gradiente nullo.

In uno strato di neve asciutta sottoposta a un gradiente verticale non trascurabile, ogni grano di neve è più caldo di quello che è al disopra di lui.

Nell'area circostante il grano, l'aria che è in equilibrio termico, può contenere più vapore acqueo di quello del grano superiore.

Lo squilibrio locale delle pressioni del vapore saturante, dà origine allora a un flusso di vapore dal grano più caldo verso il grano più freddo.

Per colmare la perdita di vapore acqueo nell'area circostante, il grano più caldo sublima dunque in parte, mentre al di sopra il grano più freddo elimina l'abbondanza di vapore acqueo al suo esterno, subendo una condensazione solida

di questa eccedenza, caratterizzata dall'apparizione d'angolosità (cristallizzazione nel sistema esagonale). Si dice che quest'ultima subisca una formazione di brina (Figura 2.4.1.2).

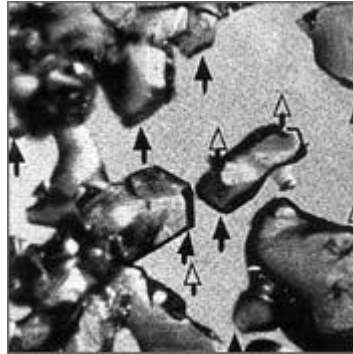


Figura 2.4.1.2 ? Schema del processo di trasferimento di massa e di formazione di **brina**
(fonte: *Neige et Avalanches* n°83, settembre 1998 : “*Le métamorphoses de la neige*”.
(par Sergent Claude) E.Brun, P.David, M.Sudul and Brunat)

Si può osservare che c'è trasferimento di massa dai grani inferiori, più caldi, a quelli superiori, più freddi, per mezzo della fase vapore.

☞☞ **La temperatura**

In caso di neve asciutta, la temperatura ha un ruolo importante sui metamorfismi poiché essa li frena o li accelera .

La quantità massima di vapore acqueo che si può mantenere intorno ad un grano dipende dalla temperatura dell'aria circostante.

Più la temperatura di uno strato di neve sarà vicina a 0°C, più la sublimazione del ghiaccio in vapore dalle parti convesse dei cristalli verso le parti concave saranno importanti e più l'arrotondamento dei grani sarà ancora più rapido.

Nell'effetto dovuto al gradiente, due strati di neve dello stesso spessore di cui le temperature inferiore e superiore siano rispettivamente, ad esempio, di : -5°C / -20°C e -15°C / -30°C, hanno temperature medie differenti e nonostante siano

sottoposte allo stesso gradiente di temperatura, la prima evolverà più velocemente.

Il vento

Si tratta in questo caso di un agente meccanico di trasformazione dei cristalli di neve che può agire sia al momento della caduta della neve o dopo le neviccate, quando è capace di riprendere la neve di superficie la cui massa volumica e la coesione sono ancora abbastanza deboli .

Le turbolenze legate al vento provocano la sublimazione di una parte dei cristalli e la collisione tra questi. Le parti fragili dei cristalli (ad esempio rami di stelle chiamate anche dendridi) resistono malamente alle sollecitazioni meccaniche e si spezzano.

Più il vento è forte, più le collisioni sono numerose, riducendo i cristalli a delle piccole particelle di ghiaccio talvolta molto fini (diametro $< 0,1\text{mm}$).

Avviene la stessa cosa per ciò che concerne la sublimazione se l'aria è relativamente asciutta. Importante oltre all'accumulazione di neve nelle zone di calma è una presa di coesione di "sinterizzazione" al momento del deposito, tanto più rapida e forte quanto sono piccole le particelle. Il deposito che si costituisce generalmente nelle conche riparate dai venti forti può avere una consistenza friabile o dura a seconda della natura dei grani di neve presenti.

E' questo fenomeno che è anche all'origine della formazione delle "cornici".

2.4.2 – I METAMORFISMI DURANTE LE PRECIPITAZIONI

Durante una nevicata con temperatura negativa i cristalli spesso agglomerati in fiocchi possono essere sottoposti all'azione meccanica del vento che ha l'effetto di sbriciolare, più o meno, a secondo della sua velocità, le strutture dendritiche fragili.

Se le distruzioni sono molto importanti, la neve che si deposita è costituita da particelle finissime e diventa difficile trovare ancora delle strutture dendritiche.

Si dice quindi che non si hanno più dei cristalli di neve fresca: (simbolo +) ma particelle riconoscibili (simbolo: /) oppure cristalli o grani di neve che si chiamano grani fini (simbolo: ?), che potrebbero essere qualificati meccanici, data la loro origine e a causa della differenziazione da coloro che sono ottenuti con meccanismi termodinamici. In assenza di vento, i cristalli di neve sono sottoposti durante la caduta all'effetto del raggio di curvatura, la cui conseguenza è un ammorbidimento dei contorni. Questo effetto è tanto più marcato quanto più la temperatura è vicina a 0°C, ma nondimeno insufficiente per far scomparire qualunque forma dendritica e la neve che si deposita è allora del tipo a particelle riconoscibili. Con temperature abbastanza basse (<-10/-8°C), l'effetto del raggio di curvatura è poco efficace e la neve che si deposita è generalmente composta da cristalli poco trasformati da neve fresca (+). In effetti, alle medie altitudini (1800/2000 m), le nevicata sono spesso accompagnate da venti più o meno forti e con temperature dell'ordine da -3 a -6°C. In queste condizioni, la neve che si deposita è costituita da una mescolanza di frammenti dendritici e di cristalli dai contorni ammorbiditi, essendo il tutto spesso più o meno ghiacciato dalle goccioline d'acqua soprafuse, captate durante la caduta.

Con la riduzione delle strutture dendritiche, la neve depositata vede diminuire le sue distanze intergranulari, e questo ha per conseguenza l'aumento della sua massa volumica. Così una neve caduta senza vento a una temperatura abbastanza bassa dell'ordine di -15°C ha in media una massa volumica dell'ordine da 20 a 50 kg/m^3 , mentre con un vento dell'ordine di 10 m/s e una temperatura di -5°C , può raggiungere valori da 150 a 200 kg/m^3 . In media, al momento della precipitazione, la neve ha una massa volumica dell'ordine di 100 kg/m^3 .

Un'altra conseguenza della diminuzione delle distanze intergranulari è il numero dei punti di contatto, intorno ai quali si produce la coesione per sinterizzazione, e aumenta anche la coesione. Dunque, più le trasformazioni saranno importanti durante la caduta (vento forte, temperatura vicina a 0°C), più la neve depositata avrà una forte densità e una forte coesione per sinterizzazione. Bisogna ricordare che parecchi giorni dopo una caduta di neve avvenuta senza vento e rimasta leggera per temperature abbastanza basse, può alzarsi il vento che trasporta la neve talvolta su lunghe distanze deponendola in luoghi in cui il vento si calma. Si assiste allora allo stesso fenomeno che avviene durante bufere di neve con il rischio di sovraccarichi locali che possono dar luogo all'innescio spontaneo di valanghe.

2.4.3 – IL METAMORFISMO DA GRADIENTE BASSO (? ? 5°C/m)

In uno strato di neve asciutta, gli effetti del raggio di curvatura e di gradiente ($^{\circ}\text{Cm}^{-1}$), sono simultanei ma antagonisti poiché uno tende ad arrotondare i cristalli mentre l'altro tende a renderli angolosi. E' il valore del gradiente di temperatura

che regola il tipo di trasformazione .

Per i gradienti deboli ($G < 5^{\circ}\text{C}/\text{m}$) l'effetto del raggio di curvatura domina rispetto all'effetto del gradiente provocando un arrotondamento dei grani ed un aumento della densità. Infatti, se in partenza, abbiamo della neve fresca (+), questa vede le sue forme smussarsi, e si trasforma a poco a poco in particelle riconoscibili (/), poi, se il processo persiste, tutte le forme dendritiche scompaiono lasciando il posto a dei grani dalle forme arrotondate chiamate grani fini (?) i cui diametri sono dell'ordine da 0,1 a 0,4 mm. La rapidità di trasformazione dipende evidentemente dalla temperatura della neve. Se il passaggio di neve fresca allo stato di particelle riconoscibili è generalmente abbastanza rapido (alcuni giorni), la comparsa dei grani fini richiede più tempo. A titolo di esempio, con un gradiente di $3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ e una temperatura media dello strato di neve di $-3, -5^{\circ}\text{C}$, bisogna aspettare una decina di giorni per ottenere un miscuglio di particelle riconoscibili/grani fini.

In questo metamorfismo, la scomparsa delle forme dendritiche si verifica con il ravvicinamento dei grani, e dunque con un aumento del numero dei punti di contatto intorno ai quali si produce la sinterizzazione. Alla scala dello strato di neve, si osserva allora un ammassamento generale, con un notevole aumento della massa volumica (che raggiunge allora valori da 200 a $300 \text{ kg}/\text{m}^3$) e al passaggio dalla coesione per feltratura, (embricatura dei dendridi) alla coesione per sinterizzazione. Questa coesione è tanto migliore quanto i grani sono piccoli poiché i punti di contatto sono numerosi.

Un solo inconveniente, questo tipo di neve manca di plasticità e sopporta male le tensioni.

2.4.4 ? IL METAMORFISMO DISTRUTTIVO

La neve fresca caduta può essere composta da stelle e da altre forme dendritiche, che, anche al di sotto degli 0°, e quindi senza il collante che costituisce l'acqua liquida, si incastrano le une nelle altre per costituire una neve a consistenza feltrosa. Può essere composta da piccole piastre o da colonne senza coesione: è un caso frequente nell'Antartico e in alta montagna. Ma la maggior parte delle volte è formata da aghi e da dendriti spezzati a seguito del trascinarsi del vento: è la neve *ventata*.

Gli sciatori chiamano *neve polverosa* qualunque tipo di neve fredda senza coesione, che non forma palle di neve quando la si stringe con un guanto sulla mano. Questa designazione generica comprende non solo la neve spezzata e ridotta in polvere dal vento o dalle lamine di sci e la neve non consolidata, ma anche quella senza coesione, la brina di superficie o di profondità. Dal momento che le stazioni sciistiche hanno abusato della parola magica *neve polverosa*, si sente perfino qualificare così, a torto, una neve fresca umida.

Che sia polverosa o che sia consolidata, la neve diventa rapidamente una neve dai grani fini amorfi, prima angolosi, poi arrotondati.

Gli esami accurati al microscopio di Bader e Yosida (1980) mostrano che quando si ha a che fare inizialmente con cristalli di neve brinata, le goccioline solide di brina scompaiono, e i dendriti si ispessiscono. Quando si tratta di nevischio (neve pallottolare), questo è trasformato in filamenti sinuosi di ghiaccio con rigonfiamenti. Yosida ha studiato la variazione del diametro delle sfere iscritte in questi filamenti di ghiaccio nel corso del tempo. Questo diametro era di 4/100 di millimetro all'inizio, si raddoppiava o triplicava in dieci giorni, per raggiungere

da 0,10 a 0,15 mm nel giro di due mesi.

Quando si ha a che fare con stelle di neve non brinata dall'inizio, oppure la cui brinatura è scomparsa, si vedono i dendriti rimpicciolire, soprattutto alla radice, e essere poi tagliati. Talvolta, un piccolo peduncolo trattiene a lungo il dendrite con la massa del cristallo. Questo peduncolo sembra essere formato non da ghiaccio, ma da impurità che si concentrano in superficie nel corso dell'evaporazione. (Si trattava in queste osservazioni di neve raccolta nella città di Sapporo).

Nel corso di questo metamorfismo qualificato come distruttivo, la densità cresce molto e con continuità, mentre la permeabilità non varia affatto. Questo metamorfismo è dovuto, nella neve fredda, unicamente alla distillazione, poiché nell'olio a -25°C che impedisce ogni genere di sublimazione, Yosida ha potuto conservare cristalli di neve per tre anni e mezzo senza osservarvi il minimo cambiamento. Ma questo metamorfismo è innegabile, anche in assenza di qualunque fusione. Koch e Wegener (1931) l'hanno osservata nel centro della Groenlandia, con temperature comprese tra i -15°C e i -50°C . Secondo Bader (1980), è generalmente ammesso che questa trasformazione si fa per distillazione delle punte verso la parte concava, poiché la pressione di vapore saturante cresce con la curvatura. Questa ipotesi qualitativamente ragionevole si rivela falsa quando si passa a calcoli quantitativi come ha fatto Yosida.

2.4.5 – IL METAMORFISMO DA GRADIENTE MEDIO ($5^{\circ}\text{C}/\text{m}$? G ? $20^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

In questo caso, la differenza di temperatura tra i grani, secondo la verticale, diviene sensibile, e ogni grano è più caldo di quello sovrastante.

I flussi di vapore legati alle differenze di temperatura fra i grani sono più importanti di quelli legati alle differenze di curvatura. La cristallizzazione del vapore d'acqua ai punti freddi, caratterizzata dall'apparizione di angolosità, è più rapida della sublimazione legata all'effetto del raggio di curvatura. Tuttavia, l'effetto di curvatura permette all'inizio del metamorfismo di provocare la sublimazione dei piccoli grani e dei rami più fini. Il risultato globale è l'apparizione di un tipo di grano angoloso che comporta delle sfaccettature che formano angoli a 120° (cristallizzazione nel sistema esagonale), chiamato grano a facce piane. Questo metamorfismo può presentare con efficacia la neve fresca, le particelle riconoscibili e i grani fini. Nei primi due casi, essa si accompagna a un ammasso importante dello strato di neve legato alla scomparsa rapida delle strutture dendritiche. Per ciò che concerne i grani fini, la variazione di densità è debole. Con un gradiente di $15\text{ }^\circ\text{C/m}$, occorrono circa 10 giorni affinché la neve fresca si trasformi in un miscuglio di particelle riconoscibili e di grani a facce piane. I grani a facce piane hanno in media delle masse volumiche che vanno da 250 a 350 kg/m^3 . Inoltre, e ciò è forse il fatto più importante, le loro dimensioni sono sensibilmente più elevate di quelle dei grani fini, potendo variare, in media, da 0,4 a 0,6 mm di diametro.

Ciò ha per conseguenza la diminuzione del numero dei punti di contatto, e dunque della coesione per sinterizzazione. Si ha, dunque con questo metamorfismo una perdita di coesione dello strato di neve, causa di instabilità quando essa è coperta da altre precipitazioni nevose.

La presenza di un tale strato, detto strato debole, è spesso osservata come piano di scivolamento nelle valanghe, tipicamente nel caso di distacco accidentale.

Tuttavia, quando uno strato di grani a facce piane è sottoposto a un gradiente debole, l'effetto del raggio di curvatura può allora procurare un ritorno alle forme arrotondate, e se questi sono ancora abbastanza piccoli, la condizione dovuta alla sinterizzazione può nuovamente consolidare lo strato.

2.4.6 ? METAMORFISMO COSTRUTTIVO: BRINA DI FONDO E ALTRE FORME

Mentre la neve fredda si altera lentamente quando la temperatura è uniforme, quando esiste un gradiente di temperatura si verificano rapide modifiche, che portano a grossi grani dalle sfaccettature geometriche. C'è allora una distillazione dei grani più caldi sui grani più freddi, da cui si ha crescita di questi ultimi. E' il metamorfismo costruttivo. La neve che si produce così a grossi grani in forma di calice, è chiamata dagli Svizzeri *Schwimmschnee*, che tradurremo *brina di profondità*.

A seguito del metamorfismo costruttivo, la densità non varia molto e resta debole. La permeabilità all'aria e al vapore acqueo, invece, aumenta di molto. Il metamorfismo costruttivo si produce solo se la densità della neve è debole, e il vapore acqueo può circolare facilmente. Quando lo strato di neve di brina di fondo è sepolto sotto nuovi strati di neve, non si ammucchia né si consolida.

Negli strati di brina di fondo, la densità del manto nevoso e la sua coesione sono dunque molto bassi, talvolta c'è perfino un vero vuoto. Così in montagna, gli strati di brina di fondo svolgono un ruolo importante nel distacco delle valanghe. In Groenlandia, dove esiste uno strato di brina di fondo d'estate a 1 o 2 decimetri

sotto la superficie, si hanno talvolta sprofondamenti su grandi estensioni, accompagnati da un rumore caratteristico.

La brina di fondo si forma nelle Alpi e in altre montagne temperate di notte, quando si stabilisce in pieno inverno un lungo periodo di bel tempo. Un forte raffreddamento notturno della superficie fa sì che le temperature decrescano uniformemente dalla base del manto nevoso alla cima, dal momento che il gradiente di temperatura è più forte verso la cima e può raggiungere fino a 1 grado/cm. Di conseguenza, il manto nevoso su più decimetri di spessore evapora, distilla a poco a poco verso l'alto, e la sua parte superiore si trasforma progressivamente in brina di fondo. Talvolta, di giorno, le temperature si innalzano sulla superficie, un minimo rialzo di temperatura si verifica anche ad una certa profondità. La brina di fondo continua quindi a formarsi solo a questa profondità.

Cito un'osservazione di Bader fatta nella Groenlandia nord-orientale a 2100 m d'altezza alla fine dell'inverno: in superficie, 25 cm di neve dai grani fini non si erano modificati per un lungo periodo. Sopraggiunse un pomeriggio di temperatura mite durante il quale la neve raggiunse gli 0°C, seguito da una nottata molto fredda (-20°C). In questa sola notte, tutto lo strato di 25 cm si trasformò in brina di fondo. Nella regione centrale della Groenlandia, durante tutto il periodo di luce continua, il suolo si riscalda in superficie, così che c'è un minimo di temperatura verso i 15 cm di profondità. E' a questo livello che si distilla allora il vapore acqueo e, come abbiamo detto, compare un orizzonte di brina di fondo.

A seguito della grande permeabilità della brina di fondo, il trasferimento di vapore acqueo non si fa più attraverso il meccanismo studiato da Yosida, ma

soprattutto attraverso convezione dell'aria. Gli strati di ghiaccio costituiscono allora un ostacolo. Neher ha segnalato che la presenza di uno strato di ghiaccio interrotto in certi punti provocava, al di sopra di questi punti, veri e propri canali verticali nella neve, che arrivavano fino a mezzo centimetro di diametro. Nelle loro vicinanze si osservano i cristalli più trasformati; sulla superficie della neve, al di sopra, compaiono dei bei cristalli di brina di superficie.

I cristalli più trasformati dal metamorfismo costruttivo prendono la forma di bicchieri a calice; i bordi del bicchiere sono orientati verso il luogo da cui viene il vapore, ossia verso il basso nelle nostre regioni. Il loro asse ottico può coincidere con l'asse geometrico oppure essergli circa perpendicolare.

Sulla superficie del manto nevoso, nei luoghi umidi, per esempio vicino all'acqua corrente, si può osservare un forte ispessimento dei cristalli, che prendono la forma di piccole placche che raggiungono talvolta la misura dell'unghia. E' la *brina di superficie* che fruscia sotto gli sci. Più modestamente, col tempo umido, strati di brina di superficie di alcuni millimetri di spessore possono depositare sulla neve. Sepolta sotto ulteriori nevicate, la brina di superficie può formare in seno al manto nevoso strati di neve dai grossi grani angolosi. Sarà differenziata facilmente dalla brina di profondità perché non è accompagnata da una diminuzione di densità e di coesione, e perché i bicchieri a calice si aprono verso l'alto e non verso il basso.

Infine, una terza forma può apparire nei crepacci o in cavità scavate da mano d'uomo quando sono state chiuse da tempo e la temperatura vi è restata negativa. Sono grossi cristalli di brina di parecchi centimetri. Vallot dal 1893 ne segnala la presenza in un tunnel scavato in cima al Monte Bianco da Imfeld, due anni prima.

La temperatura vi si manteneva sui $-16,5^{\circ}\text{C}$. Chiamo questi cristalli delle *termiti di ghiaccio*. Seligman li chiama *brina del crepaccio*. (osservazione: il termine corretto è brina di cavità).

Wegener trovò splendidi esempi di brina di cavità in Groenlandia, ma se ne possono talvolta trovare di altrettanto belli in primavera nelle nevi delle Alpi. La forma dei cristalli può essere molto varia: cupole aperte con uno o due arrotolamenti ad elica sui bordi, grosse scaglie, o ancora assemblaggi spaziali di scaglie, grossi prismi dalle facce scolpite a gradini, ecc. (Figura 2.6.2.1).

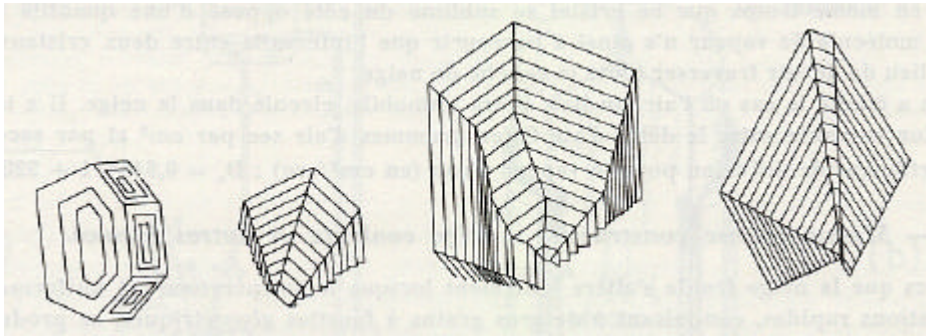


Figura 2.6.2.1 ? *Forme di ghiaccio osservate in una caverna (Da Bernard) (Figura tratta dal libro "Traité de glaciologie" Volume 1 di L. Liboutry)*

2.4.7 – IL METAMORFISMO DA GRADIENTE FORTE ($G > 20^{\circ}\text{C/m}$)

In questo caso, la differenza di temperatura tra i grani lungo la verticale è molto marcata, e i flussi di vapore sono più intensi. Il primo stadio di trasformazione è caratterizzato dalla rapida comparsa di grani a facce piane accompagnata da un'accumulazione notevole per quanto riguarda la neve recente. Poi, poco a poco, ogni grano vede la sua base crescere per condensazione del vapore acqueo che proviene dal grano inferiore. In ragione dell'intensità del flusso di vapore, questa

condensazione si ha sotto forma di ghiaccio a scalini. D'altronde, la parte superiore del grano è sede di sublimazione che conferisce al grano stesso un aspetto più arrotondato e più liscio. Nella forma finale, il grano prende generalmente una forma piramidale striata molto caratteristica. Comunemente chiamato "cristallo a calice" (simbolo \wedge): questo grano ha dimensioni importanti (da 0,6 a 2 mm e più). Su scala dello strato di neve, questi grani di grande dimensione implicano una debole coesione per sinterizzazione, dal momento che i punti di contatto sono poco numerosi. Questa neve si comporta in modo caratteristico, come sale grosso, e scorre nella mano quando si cerca di manipolarla. La sua massa volumica, poco diversa da quella dei cristalli a facce piane varia tra i 250 e i 400 kg/m³. E' evidentemente una neve che, nel manto nevoso, induce una instabilità latente importante. Sormontata da uno strato più duro, è all'origine di numerosi distacchi di valanghe a seguito dei sovraccarichi naturali o accidentali. La crescita dei cristalli a calice necessita di scambi di vapore acqueo da grano a grano di neve così come dello spazio per svilupparsi. Anche la densità della neve iniziale, per permettere questo, non deve essere troppo elevata.

In condizioni naturali, le nevi con densità iniziale che eccede i 350 kg/m³ hanno poche possibilità di evolvere in cristalli a calice, al massimo come grani a facce piane. Bisogna notare che, anche con il ristabilimento di un gradiente debole, i cristalli a calice non possono essere trasformati e lo strato manterrà la sua coesione e stabilità deboli. Solo una notevole umidificazione potrà trasformarli. L'esperienza mostra che uno strato di neve costituito da grani fini, con una densità di 260 kg/m³, e sottoposto ad un gradiente dell'ordine di 55°C/m si trasforma in

strato di cristalli a calice le cui misure raggiungono in media 2 mm nel giro di 26 giorni. Un gradiente molto forte può in alcuni giorni trasformare una neve recente in grani a facce piane.

Un esempio abbastanza classico è quello di una debole nevicata (10 cm) che si deposita su un manto nevoso umidificato. Questa caduta è seguita da un raffreddamento sensibile con delle temperature di superficie dell'ordine di -10°C . Il gradiente subito è allora dell'ordine di 100°C/m (base della caduta a 0°C). In due giorni, i grani a facce piane possono apparire e costituire uno strato debole di qualche centimetro molto pericoloso per la futura stabilità del manto.

2.5 – LA NEVE UMIDA

Quando nella neve è presente dell'acqua libera, si dice che la neve è umida, e la temperatura d'equilibrio fra le tre fasi dell'acqua (solida, liquida, e gassosa) è necessariamente di 0°C . Se ciò è vero alla scala dello strato di neve umida, non è la stessa cosa alla scala dei grani di neve per i quali la temperatura d'equilibrio o temperatura di fusione del ghiaccio saranno leggermente inferiori o perfino alcune volte superiori a 0°C (fra alcuni millesimi e circa 10 millesimi di grado) seguendo le loro forme (convessità o concavità) o la loro dimensione.

Queste piccolissime variazioni come pure la quantità d'acqua liquida presente permettono di spiegare i metamorfismi osservati.

Si possono distinguere due regimi di trasformazione legati alla quantità di acqua liquida presente o tenore in acqua liquida (TEL) (acronimo tratto da Neige et Avalanches n° 83 del settembre 1998: "Les métamorphoses de la neige" di Sergent Claude).

2.5.1 ? I REGIMI DEL METAMORFISMO DELLA NEVE

UMIDA

Il regime dei piccoli TEL

Nel caso in cui la quantità di acqua liquida fosse piccola (TEL massico < 2%). Questa sotto l'effetto delle forze di capillarità, si dispone intorno ai punti di contatto, formando così delle mezze lune d'acqua tra i grani, come pure nelle concavità dei grani. In questa configurazione, i diametri dei grani e, soprattutto, le forze capillari esercitate tra i grani avranno l'effetto di abbassare la temperatura d'equilibrio o il punto di fusione del ghiaccio.

Più la quantità d'acqua è piccola più le forze capillari sono importanti e abbassano la temperatura di fusione (dell'ordine di un millesimo di grado al disotto di 0°C).

In questa neve i grani le cui mezze lune sono le più piccole di volume, avranno dunque tendenza a fondere per primi. Questo fenomeno porta ad una armonizzazione delle quantità in acqua dei legami intergranulari. Per ciò che concerne i grani, l'abbassamento della temperatura del punto di fusione è inversamente proporzionale al loro diametro.

Di conseguenza i grani i più piccoli avranno tendenza a fondere per primi così come le parti più convesse (i loro piccoli raggi di curvatura li assimilano a dei grani di piccolo diametro).

Nei due casi, l'acqua liquida così liberata migra per capillarità verso i grani rimanenti, come pure verso le zone concave e provoca così il loro arrotondamento aumentando loro spessore congelando. Questi passaggi dallo stato solido a quello

liquido, e viceversa, inducono rispettivamente assorbimento e liberazione di calore latente di fusione che controllano il metamorfismo. La presenza di aria frena i flussi di calore tra i grani, e questi si formano principalmente per legame acqua/ghiaccio. Se la TEL aumenta, il metamorfismo diviene più rapido dando sempre di più la predominanza all'influenza del diametro dei grani. Così nei casi di TEL piccole, l'ingrossamento dei grani è abbastanza lento per la presenza di interfacce ghiaccio/aria, ma diviene più rapido quando la TEL aumenta. Tuttavia, anche se la trasformazione è lenta, alla scala dello strato di neve, si osserva un arrotondamento come pure un ingrossamento globale dei grani. Per di più, la presenza di forti pressioni capillari tra i grani mantiene una assai buona coesione d'insieme.

✍️ I regimi di forti TEL

Quando la TEL diventa importante ($> 12\%$ in massa), cioè quando la fase liquida diventa continua, le interfacce ghiaccio/aria non esistono più o molto poco.

In questo caso, la pressione capillare è debole, e solo il raggio di curvatura dei grani ha un effetto sull'abbassamento della temperatura del punto di fusione del ghiaccio (dell'ordine di 10 millesimi di grado al di sotto di 0°C). I grani più piccoli fondono allora a profitto dei più grossi sui quali c'è il rigelo poiché vi è la temperatura di fusione più elevata. Allo stesso modo le parti più convesse fondono anche a profitto di quelle che lo sono meno e particolarmente delle parti concave. In questo caso, le trasformazioni sono più efficaci perché i flussi di calore dovuti ai cambiamenti di fase si realizzano facilmente tra i grani con la fase liquida, la cui conduzione termica è nettamente superiore a quella dell'aria.

Inoltre, la pressione esercitata nei punti di contatto tra i grani, se abbastanza forte (alla base di un manto nevoso spesso), ha l'effetto di abbassare la temperatura del punto di fusione. Si osserva allora una fusione e un allargamento dei contatti. Questo effetto è importante poiché il punto di fusione può essere dell'ordine del millesimo o del centesimo di grado al disotto di 0° C. In questo regime, alla scala dello strato di neve, si assiste a un infittirsi rapido con un arrotondamento e ingrossamento dei grani, ma da un punto di vista meccanico la scomparsa dei legami tra i grani diminuisce fortemente la coesione globale.

2.5.2 ? IL METAMORFISMO DELLA NEVE UMIDA

L'umidificazione della neve può avvenire in due modi. Per fusione della superficie del manto nevoso sotto l'effetto di bilancio energetico positivo di scambi neve/atmosfera (aria calda, forte irradiazione solare, ecc), o con l'apporto diretto di acqua liquida, cioè con le precipitazioni piovose.

L'umidificazione degli strati di neve avviene essenzialmente alla superficie del manto nevoso, all'interfaccia con l'atmosfera dove si scambiano i flussi di massa ed energia.

Che si tratti di acqua di pioggia o di acqua di fusione di superficie, la sua penetrazione in profondità non avviene in modo omogeneo, ma attraverso dei cammini preferenziali o cammini di percolazione. Si possono dunque trovare in uno strato di neve umida dei TEL variabili, o addirittura su uno stesso livello orizzontale delle zone umide e delle zone asciutte. Tuttavia, per uno strato di neve la cui base non riposa su una superficie impermeabile, c'è più spesso il

drenaggio dell'acqua non appena la sua capacità di ritenuta in acqua, per capillarità, è superata. Il valore di ritenzione in acqua della neve dipende dalla sua densità prima della umidificazione e varia tra 12% in massa per delle densità dell'ordine di 250 kg/m^3 e 7% per delle densità dell'ordine di 500 kg/m^3 .

In queste condizioni, il metamorfismo implica un arrotondamento dei grani abbastanza rapido, e si può osservare la comparsa di grani arrotondati (simbolo: O).

Quanto all'ingrossamento, molto basso per le TEL basse, diventa più rapido con le TEL vicine al valore di ritenzione. L'esperienza dimostra che una neve recente sottoposta ad una umidificazione per 16 giorni, si trasforma in neve a grani arrotondati il cui diametro raggiunge circa 0,2 mm con una TEL massima dell'ordine di 2%, e 0,6 mm se la TEL è del 10% .

Più generalmente, le dimensioni dei grani arrotondati sono in genere comprese tra 0,2 e 2 mm. Alla scala dello strato di neve, si constata un aumento progressivo della densità (fino 500 kg/m^3), e la coesione abbastanza buona con valori del TEL tende a diminuire se questa aumenta.

Quando uno strato di neve umidificandosi riposa su una superficie impermeabile, o su uno strato di neve nel quale l'acqua non può scorrere (grani più grossi o neve meno densa), si può formare uno strato saturo. In queste condizioni, il metamorfismo si produce in regime di un TEL molto forte. Da una parte, l'ingrossamento dei grani è rapido e d'altra parte, i legami di ghiaccio così come quelli capillari tra i grani scompaiono. Alla scala dello strato la densità è importante e la coesione diventa molto debole. Si può allora assistere a degli scivolamenti di valanghe di neve umida o bagnata

Quando le nevi umide subiscono un raffreddamento, l'acqua liquida presente gela progressivamente creando dei solidi legami tra i grani arrotondati con formazione di agglomerati di numerosi mm, e alcune volte delle croste di ghiaccio. La neve acquista allora un'eccellente coesione detta "di rigelo". E' ciò che si può osservare frequentemente in primavera con alternanza di riscaldamenti diurni seguiti da raffreddamenti notturni.

Tutti i tipi di neve possono essere trasformati con l'umidificazione in grani arrotondati, è tuttavia la sola trasformazione che possono subire dei grani tali come la brina di fondo e la neve "pallottolare". Nel cuore dell'inverno, un forte riscaldamento accompagnato da pioggia può dunque essere salutare per il futuro di un manto nevoso reso fragile dalla presenza di tali strati.