

**Master in Sicurezza in materiali esplosivi**

**Università degli Studi di Genova – Mariperman La Spezia  
Corso di perfezionamento - A.A. 2004/2005**

**IMPIEGO DI ESPLOSIVI IN SCENARI D'INTERVENTO COMPLESSI.**

*Lo studio di due casi limite: la rimozione del materiale residuale dagli altoforni e il distacco artificiale di valanghe alla luce dei fenomeni di variabilità spaziale e di dinamica.*

a cura di Scaini Stefano  
(Dexplo S.r.l. – Parma)

Relatori: Cardu M. – Vassale R.

- Premessa

L'utilizzo di esplosivi negli ambiti dell'Ingegneria Civile, Industriale e del Territorio è quasi sempre correlato alla gestione contemporanea di problematiche relative al controllo delle proiezioni, delle polveri e alla riduzione delle sollecitazioni vibratorie indotte dall'intervento.

Come è ben noto, un'efficace gestione degli effetti cosiddetti "indesiderati" si ottiene mediante l'applicazione di procedure operative sia attive che passive.

Le prime, ad esempio, partono da un corretto piano di caratterizzazione (che può essere tanto un'esauritiva relazione geologica quanto un'attenta analisi di struttura) per poi estendersi ad aspetti legati alla scelta dell'esplosivo da utilizzare, all'esecuzione della perforazione e di eventuali pre-tagli, nonché alla progettazione della geometria di sparo e altro ancora.

Per applicazione di procedure di tipo passivo si intende invece la messa in opera di accorgimenti quali la creazione di terrapieni in materiale sciolto, la predisposizione di protezioni mediante reti metalliche e materiale geotessile, nonché l'utilizzo di vasche e speciali nebulizzatori per l'abbattimento delle polveri.

Esistono molti scenari d'intervento, di certo meno consueti e conosciuti, ove si rende necessario l'utilizzo di materiale esplodente.

Alcuni di questi, quali ad esempio la rimozione di scorie dalle caldaie, l'evacuazione del materiale residuale dagli altoforni e il distacco programmato di valanghe, sono decisamente articolati e per questo motivo vengono chiamati "**complessi**" o "supercritici".

Tale denominazione viene a loro assegnata in quanto sono caratterizzati da aspetti notevolmente anomali i quali, come si vedrà in seguito, non dipendono solamente da fattori climatici e logistici.

In questi scenari è in particolar modo la caratterizzazione del materiale da abbattere a rendere problematica la fase operativa; le caratteristiche di omogeneità ed isotropia assolutamente "relative" impongono infatti approcci diversi e a dir poco esclusivi.

Al fine di evidenziare al massimo questa particolarità, si è scelta l'analisi di due casi limite dell'applicazione di tecnologie in scenari di tipo complesso: altoforni e siti valanghivi.

In questi due generi d'intervento risulta paradossale la diversità di approccio e di applicazione delle procedure operative di tipo attivo; ciò è dovuto essenzialmente alla disponibilità o meno di strumenti e tecnologie d'indagine da utilizzare prima e durante l'intervento.

Infatti, se nella rimozione del materiale residuale dagli altoforni si deve necessariamente seguire un "modus operandi" capace di tarare l'efficacia e l'efficienza dell'intervento solamente passo dopo passo, il distacco programmato di valanghe ha potenzialmente a disposizione tali e tante tecnologie di verifica e simulazione da rendere l'intervento gestibile in ben altro modo rispetto al primo.

### La rimozione del materiale residuale dagli altoforni.

I materiali metallici vengono prodotti trattando opportunamente, di solito per via termica, minerali e talvolta rottami e recuperi. La fabbricazione dei materiali metallici prevede, inoltre, l'impiego di una certa quantità di materie prime necessarie al processo quali carbone, scorificanti e gas riducenti.

In particolare la "metallurgia del ferro" o "siderurgia" può essere basata su minerali (costituiti esclusivamente da ossidi) o su rottami e recuperi.

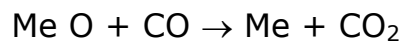
Gli ossidi subiscono un processo di riduzione nell'altoforno dando origine alla ghisa; solo una piccola parte di questa viene destinata all'ottenimento di prodotti da fonderia mentre la maggior parte è trasformata in acciaio grezzo, tramite appositi convertitori, mediante un processo detto "conversione". La fusione dei rottami e dei recuperi è invece eseguita mediante speciali forni elettrici.

La riduzione di un ossido metallico consiste nel fare avvenire la reazione di dissociazione



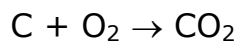
La facilità con cui questa reazione avviene è talmente legata all'affinità del metallo per l'ossigeno che gli ossidi di certi metalli devono addirittura essere semplicemente riscaldati perché essa avvenga.

Gli ossidi di altri metalli invece, affinché avvenga la reazione sopra citata, dovrebbero essere riscaldati a temperature talmente elevate da dover ricorrere a processi a volte economicamente sconvenienti o addirittura tecnicamente non possibili. Spesso per ovviare a problematiche di questo genere si utilizzano, a complemento delle fasi di riscaldamento, agenti riduttori come il gas CO provocando la reazione



Nella pratica le condizioni favorevoli alle reazioni di riduzione vengono raggiunte per mezzo di una speciale apparecchiatura chiamata "altoforno". Esso è costituito da una torre di materiale refrattario rivestita esternamente di acciaio.

Mentre dall'alto si introducono alternativamente minerali di ferro e coke, dal basso si insuffla aria calda la quale provoca la combustione del coke :



Questa reazione, fortemente esotermica, determina la fusione del minerale che viene ridotto nella parte alta dell'altoforno da CO ( generato dalla reazione  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO}$  ) e nella parte bassa per opera diretta del carbonio.

La scoria, che è composta principalmente da ossidi di Si, Ca, Al, Mg, Fe e Mn e che viene detta "loppa", galleggia sul metallo fuso e può essere facilmente separata da questo.

La ghisa viene invece prelevata dall'altoforno ad una temperatura di 1350 ÷ 1400°C e presenta la seguente composizione chimica :

- C = 3,5 ÷ 4,5 %
- Si ≅ 1%

- Mn  $\cong$  1%
- S  $\cong$  0,1%
- P  $\cong$  0,1%

Una procedura da eseguire obbligatoriamente con periodicità ed attenzione per una corretta e produttiva gestione di un altoforno, è senza dubbio quella relativa alle **fermate programmate**. Durante questi periodi di "upgrading" si procede ad un approfondito aggiornamento di tutto il sistema, partendo dall'analisi dei processi fino ad arrivare alla vera e propria manutenzione tecnica.

Una delle attività previste durante questo "iter" è lo svuotamento della parte inferiore dell'altoforno, con la conseguente evacuazione della cosiddetta "salamandra" e la rimozione quindi di "loppa", carboni circolari, carica di materiale residuo e di un miscelanea di materiale ferroso di tipologia varia.

Una delle fasi più delicate da affrontare durante l' "upgrading" di un altoforno è senza dubbio, come già accennato in precedenza, l'attività di **evacuazione della salamandra**, a maggior ragione qualora avvenga mediante l'utilizzo calibrato di microcariche esplosive.

Questa lavorazione, individuata peraltro nel "project management" sempre come supercritica, dimostra ogni volta, già dal primo giorno di cantiere, di racchiudere in sé una notevole quantità di problematiche le quali, spesso amplificate dal particolare contesto operativo, mettono a dura prova l'intera struttura delle maestranze coinvolte.

Basti pensare a casi accaduti nei quali, al momento della fermata dell'altoforno, il quantitativo stimato di salamandra esistente fosse notevolmente superiore alla media, addirittura a volte di circa 400 m<sup>3</sup> , per un peso totale di oltre 1000 tonnellate.

Una volta eseguito il **taglio della corazza**, effettuato lato campo di colata ed avente dimensioni nell'ordine di m 3,5 x m 7,0, il forno si presenta visivamente pieno nella parte inferiore (salamandra più carica residua).

L'operatività quindi inizia con l'evacuazione della carica e dei **carboni circonfenziali** mediante l'utilizzo di miniescavatori, continuando poi con l'attività di evacuazione della salamandra mediante l'utilizzo di cariche esplosive.

Alla luce della disponibilità dei prodotti idonei all'impiego in campo civile, la scelta della tipologia di esplosivo da utilizzare in questo genere d'intervento è pressoché obbligata.

Infatti, la necessità di esplosivi dotati di ottima stabilità agli shocks termici, caratterizzati da elevate velocità di detonazione e garanti di buoni risultati in termini di "brisanza", orienta necessariamente la scelta dell'utilizzatore verso la categoria delle gomme e delle gelatine ad alto potenziale.

L'attività sopra citata si protrae per settimane e a volte addirittura per due o tre mesi risultando particolarmente impegnativa, come in precedenza anticipato, per i seguenti motivi :

- eccezionale presenza di un'enorme quantità di salamandra da evacuare
- caratteristiche di particolare spugnosità del materiale presente dalla superficie sino ad una profondità di circa 1,5 metri

In conseguenza di ciò, specialmente all'inizio del cantiere, la produzione risulta spesso notevolmente inferiore alle aspettative: ad ogni brillamento gli strati più superficiali della salamandra si frantumano non solamente in modo del tutto casuale, ma addirittura con una pezzatura estremamente ridotta.

Si deve quindi attendere l'evacuazione di circa il 40% della salamandra, cioè fino all'esaurimento della parte spugnosa, per riuscire ad ottenere una produzione "efficace", caratterizzata dal distacco di blocchi mediamente pari a circa 2 m<sup>3</sup>, ovvero circa 15 T di peso.

Di fondamentale importanza si rivela il "modus operandi" adottato per l'attività di evacuazione dei carboni circonfenziali e funzionale all'utilizzo delle microcariche esplosive.

Questa attività si ripete infatti a più riprese seguendo l'andamento della rimozione della salamandra, in modo tale da lasciare sempre lo spazio

necessario tra la corazza dell'altoforno e la salamandra oggetto delle attività di brillamento.

Nonostante possa sembrare apparentemente una banalità, è invece di estrema importanza specificare come questo spazio utile sia funzionale non solamente a fornire un'adeguata superficie libera al lavoro delle microcariche esplosive ma, in particolar modo, a garantire uno spazio per così dire "di rispetto" al fine di limitare la trasmissione delle sollecitazioni meccaniche indotte dalla detonazione nei confronti della struttura dell'altoforno.

Solamente dopo aver "pesato" attentamente in fase di progettazione le caratteristiche strutturali dell'altoforno in oggetto, è possibile procedere all'esatta taratura dei parametri di lettura e registrazione dei sismometri i quali, dal primo brillamento all'ultimo, devono monitorare costantemente tutte le strutture da salvaguardare nelle immediate vicinanze nonché particolari importanti quali, ad esempio, i giunti ceramici presenti negli impianti adiacenti. L'attività che risulta essere quella preponderante dal punto di vista temporale, nonché di estrema importanza per il buon esito delle operazioni di brillamento, è certamente quella relativa alla **perforazione** della salamandra stessa; fondamentali sono in particolar modo il corretto posizionamento delle maglie di perforazione ed il rispetto scrupoloso delle profondità dei fori.

La perforazione, sempre effettuata mediante lancia termica ad ossigeno, è generalmente caratterizzata da un diametro di circa 15-25 cm e da profondità variabili tra i 70 ed i 180 cm, gestite in relazione alle caratteristiche proprie degli strati di salamandra con i quali di volta in volta ci si deve confrontare.

Una volta effettuate le operazioni di perforazione, che avvengono generalmente dalle ore 23,00 alle ore 12,00 del giorno seguente, si deve badare al raffreddamento dei fori eseguiti fino ad una temperatura non superiore ai 45° C.

Per non gravare ulteriormente su di una lavorazione già di per sé molto critica e quindi ricca di problematiche proprie quale ad esempio il caricamento dei fori con esplosivo, si deve curare con estrema attenzione l'attività di **raffreddamento** dei fori, assegnandole la massima priorità possibile.

Per questo motivo infatti, l'inizio delle operazioni di caricamento con esplosivo subisce spesso ritardi e addirittura, a volte, rinvii alle giornate successive, non potendo essere garantito, in presenza di raffreddamento insufficiente, un adeguato standard di sicurezza per il personale impiegato nelle attività.

A volte si preferisce eseguire un'attività di perforazione "no-stop" per più giorni consecutivi al fine di poter permettere le operazioni di **brillamento** per l'intera nottata o addirittura per più giorni consecutivi.

Quest'ultimo "accorgimento" operativo si adotta ogni qualvolta, in presenza di una produzione caratterizzata da pezzature di notevoli dimensioni, si rende necessaria una particolare organizzazione del sistema di **carico e trasporto a recupero** del materiale di risulta.

L'evacuazione della salamandra mediante l'utilizzo di microcariche esplosive avviene quindi, una volta alleggerita la stessa della parte spugnosa presente in superficie, creando piccoli terrazzamenti sui quali si procede alla perforazione, utilizzando una maglia avente mediamente un passo di 40 cm circa.

Le attività di caricamento dei fori con esplosivo ed il conseguente brillamento avvengono generalmente dalle ore 19,00 alle ore 23,00, in una fascia oraria appositamente identificata quale quella di minor affluenza del personale all'interno dello stabilimento.

Tutto ciò impone di non lasciare nulla al caso, neppure aspetti solitamente considerati secondari e talvolta "di routine".

La contingenza di dover operare con esplosivi in un ambiente confinato, caratterizzato da una temperatura attorno ai 50° C circa e con un'illuminazione pressoché nulla, può dare una dimensione esatta della definizione di "particolare contesto operativo".

Anche analizzando l'intervento con un approccio di natura esclusivamente esplosivistica, si individuano aspetti e problematiche assolutamente singolari.

D'altronde, al cosiddetto "sparo in masse calde", sottintendono procedure di sicurezza, programmi di controllo, protocolli d'intervento, norme comportamentali ed una generale pianificazione e gestione del cantiere che esulano senza dubbio dai canoni classici dell'intervento con materiali esplosivi.

Operando brillamenti in uno scenario come quello oggetto della presente analisi, le circostanze da evitare in assoluto sono essenzialmente le seguenti :

1. tempi prolungati di permanenza dell'esplosivo all'interno del foro (nel nostro caso specifico non più di 20 ÷ 25 minuti);
2. interventi post-brillamento su eventuali cariche inesplose;
3. anomalie all'interno del circuito dei detonatori.

Per evitare di dover affrontare contingenze come quelle sopra elencate, è bene quindi operare nel seguente modo :

- una volta ispezionati accuratamente i fori, valutandone sia la conformazione che la temperatura, si scelgono quelli deputati al brillamento (generalmente non più di 6 ÷ 8 per volata), procedendo a posizionare borrhaggio e calcatoio in corrispondenza di ciascuno;
- il borrhaggio, generalmente eseguito con sabbia, può essere sostituito "in itinere" con massa refrattaria per garantire, specie durante i brillamenti degli strati più omogenei e compatti della salamandra, una tenuta ottimale alla detonazione delle microcariche;
- all'esterno dell'altoforno si deve testare preventivamente ogni singolo detonatore allestendo, opportunamente cortocircuitato ed isolato alla perfezione in corrispondenza delle connessioni, il circuito definitivo completo della linea di tiro; particolare attenzione deve essere posta nell'isolamento delle connessioni, al fine di evitare il contatto accidentale con la preponderante e conduttiva massa ferrosa;
- per scongiurare ulteriormente la possibilità, seppur remota, di dover intervenire dopo il brillamento per eventuali cariche inesplose, è preferibile optare, nel caso in cui la temperatura all'interno di un foro fosse giudicata "appena sufficiente a procedere", per il posizionamento di due detonatori per ogni singolo foro da mina;

- nel contempo è necessario predisporre, dopo averla adeguatamente confezionata, la quantità di esplosivo ritenuta necessaria presso ogni foro da caricare;
- si procede infine alle operazioni di caricamento e borrhaggio utilizzando una squadra di due operatori ogni coppia di fori, mentre è bene assegnare a due tecnici specializzati la supervisione del lavoro e la verifica finale della linea di tiro;

Tutto questo al fine di evitare un'eccessiva permanenza delle cariche all'interno dei fori una volta costipate, per scongiurare eventuali casi di detonazione spontanea e al fine di garantire inoltre, con la massima percentuale di probabilità, il costante esito positivo ogni qualvolta il circuito elettrico venga testato un attimo prima di effettuare il brillamento.

All'attività svolta per effettuare ogni singolo brillamento devono inoltre sempre seguire diverse importanti fasi quali :

1. la verifica dell'avvenuto "sfumo" all'interno dell'altoforno;
2. il controllo visivo dell'avvenuta volata eseguito foro per foro;
3. l'analisi e la comparazione dei dati rilevati dai sismometri;
4. il debriefing tra gli operatori intervenuti nelle operazioni;
5. la verifica "in situ" di quanto previsto dal progetto;
6. l'eventuale ritaratura dei parametri d'intervento alla luce dei risultati ottenuti con i brillamenti più recenti.

### *Il distacco artificiale di valanghe alla luce dei fenomeni di variabilità spaziale e di dinamica.*

- Generalità

Le valanghe rappresentano uno dei fenomeni naturali dai quali restano periodicamente e maggiormente coinvolte le popolazioni che occupano zone di

montagna. Considerando che in Svizzera, ad esempio, nel corso degli ultimi 50 anni si sono verificati più di 7000 eventi valanghivi i quali, oltre a provocare la morte di circa 1300 persone, hanno arrecato danni economici per oltre 300 milioni di franchi svizzeri, si possono ben comprendere le motivazioni che, di recente, hanno portato ad un'intensificazione degli studi relativamente alla previsione e quindi prevenzione di questo genere di rischio.

I settori di attività coinvolti dal pericolo valanghe sono molteplici: quello dei trasporti (interruzione di importanti vie di comunicazione su gomma, rotaia ed impianti funicolari), delle costruzioni (demolizione parziale o totale di strutture di varia tipologia ed utilizzo), del patrimonio forestale (distruzione di vaste aree boschive), delle risorse faunistiche (prevalentemente colpite in maniera indiretta dal fenomeno) e del turismo (forzata interruzione dell'attività turistica con tutti i danni, sia diretti che indiretti, che ne possono derivare).

Per questo motivo, negli ultimi anni, moltissime realtà con territorio montano urbanizzato e potenzialmente soggetto a rischio valanghe hanno istituito commissioni tecniche, proposto e sviluppato normative ed inserito nelle attività di Protezione Civile tale materia.

- L'equilibrio del manto nevoso

L'analisi dei meccanismi che mantengono o meno la neve in equilibrio sui versanti, può aiutare a comprendere meglio i "punti deboli" del sistema e ad intervenire nel modo più opportuno.

Roch ha dimostrato come i cristalli di neve, se accatastati su una tavola in stato di quiete, restino in equilibrio sino a raggiungere un valore angolare limite, specifico di quel tipo di cristallo, detto angolo di attrito statico (ovvero l'angolo massimo di inclinazione oltre il quale i cristalli di una specifica classe, disaggregati, si metterebbero spontaneamente in moto).

Se successivamente la tavola viene sottoposta a sollecitazioni vibratorie, una certa quantità di cristalli rotola lungo i fianchi assestandosi in un cumulo e raggiungendo in tal modo un nuovo valore angolare, detto angolo di attrito

cinetico (ovvero l'angolo minimo di inclinazione sul quale i cristalli, già in stato di moto, continuano nel loro movimento).

In seguito alla trasformazione dei cristalli i quali perdono la loro forma iniziale, la neve tende, su un piano orizzontale, ad assestarsi.

Su un pendio invece, la neve slitta anche molto lentamente verso valle. Questo movimento combinato di assestamento e slittamento viene denominato "neviflusso" (o scorrimento); esso crea delle tensioni nel manto nevoso che vengono solo in parte compensate dalle sue caratteristiche di deformabilità (o plasticità).

Secondo lo studioso Roch la neve può essere assimilata a certi tipi di suolo e se, su un pendio di uniforme inclinazione, si considera un'unità di superficie infinitamente lunga e larga (al fine di trascurare gli effetti "di contorno"), ne si può determinare la stabilità **S** come il rapporto esistente tra la resistenza al taglio **R** dello strato più fragile e la sollecitazione al taglio **T**, dovuta alla componente nel senso del pendio del peso della neve al di sopra dello strato fragile considerato.

La resistenza **R** è data dalla coesione e dall'attrito statico, che varia per i diversi tipi di cristalli ed è proporzionale alla pressione della neve, mentre la sollecitazione al taglio **T** è pari alla componente parallela al pendio del peso **P** dell'elemento considerato.

Perché si verifichi una rottura occorre naturalmente che la resistenza scenda a valori inferiori rispetto alla sollecitazione (**R** < **T**) oppure che i valori di sollecitazione **P** siano superiori ad **R** (**T** > **R**).

La resistenza di uno strato di neve può ridursi, anche notevolmente, per due motivi principali:

- A. aumento della temperatura
- B. fenomeni di metamorfismo

Un aumento di temperatura dell'aria ha come conseguenza un aumento di temperatura della neve la quale, avvicinandosi al suo punto di fusione (0°C), inizia a perdere resistenza.

I metamorfismi della neve mutano non solo la forma ma anche l'interazione tra i cristalli di uno stesso strato e tra diversi strati adiacenti, fino a ridurre e talvolta rendere nulle le forze coesive esistenti.

Un'esplosione, generando sollecitazioni di carattere meccanico nei mezzi aria, neve e suolo, provoca la frantumazione delle sottili ramificazioni dei cristalli e di conseguenza il cedimento dei contatti tra i cristalli di ghiaccio; il risultato di tutto ciò è un passaggio, da parte del manto nevoso, da uno stato di aggregazione più forte ad uno più debole.

La neve perde in questo modo coesione e, al passaggio dei cristalli allo stato di moto, l'angolo di attrito statico di partenza si riduce ad angolo di attrito cinetico, o di movimento.

La neve fresca riesce a restare in equilibrio addirittura sulla verticale ma, qualora messa in movimento, può conservare il suo moto sino a quando l'inclinazione del pendio non si adagia su valori inferiori ai 20°.

- Il distacco per sovraccarico

Quando le sollecitazioni aumentano progressivamente, come sotto l'effetto di sovraccarico dovuto a nuove precipitazioni, e sino al raggiungimento di valori critici in funzione delle resistenze, si produce un **distacco spontaneo**.

Nell'istante del distacco si verifica una diminuzione istantanea della resistenza, mentre la sollecitazione assume valori costanti.

La propagazione del movimento si estende a tutto il pendio di ugual inclinazione sul quale si è rotto l'equilibrio, dopo di che ha inizio il moto vero e proprio.

Durante una precipitazione di carattere nevoso il limite di equilibrio è raggiunto dapprima sui pendii di elevata inclinazione (>45°), ove sovente si verificano scaricamenti multipli della neve depositatasi in eccesso.

Sui pendii di minor inclinazione (da 30° a 35°) invece, occorre una maggior quantità di neve per raggiungere il limite di equilibrio; in questi casi i volumi delle masse che possono mettersi in movimento raggiungono a volte dimensioni tali da rischiare la catastrofe.

Può accadere che una causa esterna (o antropica) provochi un aumento delle sollecitazioni in un determinato punto o lungo una determinata direttrice del manto nevoso, aumento tale da superarne le resistenze.

Contrariamente al caso del distacco spontaneo, in cui la sollecitazione è estesa a tutto il pendio, questa sollecitazione è limitata alla sola superficie interessata dalla causa accidentale (per esempio, il passaggio di uno sciatore, di una motoslitte o altro).

Perché si verifichi il **distacco accidentale**, occorre che il movimento iniziale possa propagarsi e la possibilità che questo accada dipende strettamente dal grado di stabilità del manto nevoso e dal volume di neve interessato dalla causa accidentale: non solo situazioni di debole resistenza quindi, ma soprattutto grandi superfici coinvolte dalla perturbazione meccanica!

- Definizioni e classificazione dei fenomeni valanghivi

Le **valanghe** o slavine (termini etimologicamente diversi ma col medesimo significato) sono movimenti di massa del manto nevoso e pertanto, a parte la caratterizzazione del mezzo, la loro dinamica può essere studiata partendo dai concetti di base impiegati nello studio dei fenomeni franosi di "debris flow", ovvero fenomeni di scorrimento geofisico denominati "flussi detritici".

A causa della marcata variabilità del clima montano e delle conseguenti continue trasformazioni fisiche a cui è soggetto il manto nevoso, la previsione e, di conseguenza, la prevenzione del fenomeno valanghivo presenta problematiche molto più complesse rispetto a quello franoso.

I due principali settori di ricerca al riguardo sono oggi rappresentati dalla definizione del grado di rischio e dallo studio della dinamica del fenomeno.

Il primo è orientato alla determinazione di veri e propri "valori limite", cioè allo studio di parametri significativi che possano essere scelti come indicatori dei diversi gradi di rischio all'interno della scala di pericolosità.

Il secondo, invece, ha come obiettivo la definizione delle equazioni che approssimano il movimento delle masse nevose; dal loro studio dipende la possibilità di valutare i danni attesi dal singolo evento valanghivo, sia esso

spontaneo o provocato, e quindi la determinazione di costanti quali l'altezza e la profondità del distacco, l'entità delle superfici interessate dalla massa nevosa in movimento e la conseguente stima delle grandezze legate alla fase di "runout", ergo le distanze di arresto del fenomeno nelle sue molteplici componenti e la stima delle quantità di accumulo.

Il fenomeno valanghivo, osservato nel suo completo svolgimento, può essere ritenuto composto da due fasi distinte:

1. una prima fase, caratterizzata da una scala temporale dell'ordine dei giorni o delle settimane, comprendente l'insieme dei processi fisici (precipitazioni, stratificazioni e metamorfismi) che precedono il distacco vero e proprio della massa nevosa. In questa fase avviene quindi la formazione dello strato nevoso e si realizzano le condizioni che portano alla sua instabilità e al conseguente innesco del distacco o "triggering";
2. una seconda fase, caratterizzata da una scala temporale dell'ordine dei secondi o dei minuti, comprendente l'insieme di tutti i fenomeni dinamici successivi al distacco ed associati al moto della massa nevosa lungo il pendio.

Un sito valanghivo costituisce un'area ben determinata all'interno della quale si verificano i moti di massa.

La **zona di distacco** è la parte del sito in cui ha tipicamente origine il movimento delle masse di neve instabili.

La **zona di scorrimento** o di transizione, dove avviene il moto della valanga con possibile deposito o raccolta di ulteriore materiale, è l'area sottostante la zona di distacco e collega quest'ultima con la zona dove la valanga si arresta.

La **zona di arresto** o di deposito è l'area in cui avviene la fase di decelerazione della massa nevosa in movimento; nella parte più a valle di questa zona la neve si accumula e si può osservare il massimo avanzamento del fenomeno.

Qualora si verifichi il caso in cui diverse zone di distacco nettamente separate tra loro da creste o boschi convogliano masse nevose verso una sola zona di scorrimento, si adotterà la definizione di "aree di distacco multiple".

Si è già accennato come l'evoluzione storica del manto nevoso determini le condizioni al distacco e questo accade sia in termini di volumi che di proprietà meccaniche del materiale: questo influenza notevolmente le caratteristiche della seconda fase del fenomeno e cioè quelle relative alla dinamica della valanga.

Le valanghe di neve possono quindi presentare modalità di innesco e tipologie di movimento estremamente differenziate in relazione sia allo stato fisico del manto nevoso che origina la valanga, sia alle caratteristiche topografiche ed orografiche del sito in cui ha luogo il moto della stessa.

Una classificazione sistematica del fenomeno risulta pertanto un'operazione assai complessa in quanto generalizzare significherebbe considerare trascurabili variabili importanti e fortemente discriminanti dei fenomeni in gioco.

La classificazione più razionale è senza dubbio quella basata su un criterio di tipo morfologico relativo alle tre diverse zone in precedenza descritte: distacco, scorrimento e arresto.

Ad ognuna delle tre zone sono associati criteri atti a delineare differenze di tipo fisico, topografico e fenomenologico come di seguito riportato.

Nella zona di distacco si individuano le modalità di distacco, la posizione della superficie di slittamento e il contenuto in acqua liquida della neve al distacco.

Nella zona di scorrimento si individuano invece le caratteristiche del movimento della valanga e la morfologia del pendio sul quale si verifica tale moto.

Nella zona di arresto o di deposito, infine, vengono individuate la rugosità superficiale e il contenuto in acqua libera del deposito, nonché l'inquinamento dello stesso.

Fissando l'attenzione sulle modalità di movimento della massa nevosa lungo il tracciato, la suddivisione precedentemente introdotta riconosce due categorie:

## 1. Valanghe **di tipo nubiforme o polverose**

Sono caratterizzate da un movimento che avviene prevalentemente sotto forma di miscuglio bifasico neve-aria, con concentrazioni della neve estremamente ridotte (densità medie dell'ordine dei  $5 \cdot 10^0 \div 5 \cdot 10^1 \text{ Kg/m}^3$ ) e da una netta prevalenza delle forze di resistenza dovute all'aria circostante rispetto alle dissipazioni meccaniche legate alle collisioni e al contatto continuo tra i grani di neve.

Le valanghe nubiformi hanno origine nel caso di neve asciutta e leggera a bassa coesione, la quale si scarica su pendii molto ripidi e sufficientemente lunghi da permettere lo sviluppo di una consistente componente polverosa.

La formazione di questa tipologia di scorrimenti nevosi è inoltre favorita dalla presenza lungo il percorso di conformazioni orografiche che favoriscono il processo di sospensione delle particelle nell'aria, quali ad esempio i salti di roccia verticali.

Sono caratterizzate da elevate velocità di propagazione, talvolta superiori ai 100 m/s, e da altezze di scorrimento che possono raggiungere anche il centinaio di metri; risultano inoltre essere poco influenzate nel movimento dalle caratteristiche locali di orografia del terreno;

## 2. Valanghe **radenti o di neve densa**

Il movimento della neve risulta prevalentemente confinato in prossimità del terreno e le caratteristiche di moto sono assimilabili a quelle delle correnti idrauliche a superficie libera.

Per questo tipo di scorrimenti è quindi possibile ipotizzare una separazione piuttosto netta tra il materiale in movimento e l'atmosfera, ritenendo gli effetti resistivi dell'aria di portata trascurabile sulla dinamica del fenomeno; le resistenze al moto sono in questo caso principalmente legate alle dissipazioni meccaniche

prodotte dalle collisioni intergranulari e all'azione della superficie di scorrimento sul mezzo in movimento.

Le concentrazioni del materiale rimangono prossime a quelle della neve al suolo prima del distacco (densità tipicamente comprese tra  $150 \div 500 \text{ Kg/m}^3$ ).

Le velocità sono comprese tra qualche metro al secondo e diverse decine di metri al secondo, con altezze di scorrimento tipicamente dell'ordine dei  $10^0 \div 10^1 \text{ m}$ .

Con riferimento alla classe di valanghe di tipo radente permane in natura un'ampia casistica di scorrimenti con caratteristiche morfologiche e comportamento dinamico assai differente.

Tali tipologie sono essenzialmente determinate dalle caratteristiche del materiale che origina il distacco e dalla configurazione topografica del percorso seguito dalla valanga.

Tra i tipi di valanghe radenti che si possono identificare in base alle proprietà fisiche della neve messa in movimento si hanno:

- Valanghe radenti **di neve umida o bagnata**

La neve che le compone presenta tipicamente un'elevata densità (dell'ordine dei  $300 \div 500 \text{ Kg/m}^3$ ) ed un consistente tenore di acqua libera tra le particelle.

Questo genere di valanghe presenta velocità massime comprese tra qualche metro al secondo e  $20 \div 30 \text{ m/s}$  e può propagarsi anche su pendenze molto ridotte. A causa delle velocità moderate tende a seguire la forma del pendio e a cambiare quindi direzione molto facilmente.

A causa dell'elevata densità della neve bagnata, che favorisce l'intrusione negli strati già presenti al suolo, tali valanghe hanno spesso origine sotto forma di valanghe **di fondo** (ovvero con il suolo che, nella zona di distacco, funge da base di scivolamento) e le modalità di distacco possono essere sia puntuali che a lastroni;

- Valanghe radenti **di neve asciutta**

La neve che le origina presenta mediamente densità più ridotte rispetto alle valanghe di neve umida (circa un 30% in meno) sia per l'assenza di acqua allo stato liquido che per la diversa struttura dei granuli che le costituiscono.

Morfologicamente il movimento della valanga si differenzia notevolmente dalle precedenti e spesso si osservano consistenti componenti nubiformi al di sopra della parte densa dello scorrimento.

Le velocità di propagazione vanno dai 10 m/s ai 50 m/s in relazione alla tipologia del pendio e, a parità di configurazione topografica, si propagano assai più rapidamente di quelle di tipo umido, iniziando però a rallentare su pendenze più elevate.

La meccanica del fenomeno è caratterizzata da un comportamento di tipo granulare del materiale e da intense collisioni delle particelle all'interno del mezzo e in corrispondenza del contorno fisico: questi urti controllano i processi dissipativi e le resistenze al moto.

La modalità di distacco più tipica è quella **a lastroni** ed avviene in corrispondenza di un'estesa linea di frattura detta **coronamento**.

Le caratteristiche del moto di una valanga di tipo radente sono strettamente legate anche alla configurazione topografica del pendio su cui si scarica il fenomeno; è in riferimento a ciò che si può evincere un'ultima distinzione:

- Valanghe radenti **di versante**

Il moto della valanga avviene in corrispondenza di versanti aperti e generalmente privi di vegetazione.

L'assenza di confinamento laterale per la massa nevosa in scorrimento permette uno spargimento laterale del flusso che, in concomitanza con il meccanismo di "ripresa" della neve al suolo, può comportare un

continuo aumento della massa in movimento e delle dimensioni della valanga;

- Valanghe radenti **canalizzate**

Il movimento avviene all'interno di canali o di strette vallate ed il fenomeno della ripresa di neve al suolo ha in questo caso un rilievo minore.

L'incanalamento comporta la nascita di attriti e resistenze di scorrimento anche sui fianchi della valanga, delineando un moto complessivo maggiormente frenato.

In realtà la distinzione appena fatta appare eccessivamente limitativa; infatti molto spesso le valanghe nelle diverse fasi del loro percorso passano da condizioni di moto di versante a condizioni di moto incanalato e viceversa.

I processi che accompagnano rispettivamente l'incanalamento del flusso e l'uscita dal canale, con il conseguente spargimento della massa nevosa su un conoide di deiezione, possono in molti casi influenzare fortemente le caratteristiche dinamiche del fenomeno e, in particolare, le distanze di arresto raggiunte dalla valanga.

- La protezione dai fenomeni valanghivi

La protezione dalle valanghe può essere predisposta ed attuata con misure permanenti o temporanee.

La **difesa permanente** ha un duplice obiettivo: ridurre le condizioni favorevoli allo sviluppo di valanghe agendo sulla stabilizzazione del manto nevoso nella zona di distacco (**difesa attiva**) e limitare o annullare i danni dovuti al passaggio di un'eventuale valanga, deviandone il percorso e proteggendo le infrastrutture (**difesa passiva**).

La difesa attiva si attua con 3 tipi di intervento:

1. modifica del suolo generalmente tramite il rimboschimento e la creazione di terrazzamenti che, aumentando le caratteristiche di rugosità del suolo, frenano lo slittamento della neve;
2. trattenimento del manto nevoso con opere paravalanghe quali ponti fermaneve, rastrelliere, reti e strutture in legno o acciaio distribuite su più linee parallele nella zona di distacco;
3. controllo della neve trasportata dal vento tramite barriere frangivento e deflettori che, modificando il flusso del vento, limitano la formazione di cornici in punti particolarmente critici.

La difesa passiva si attua con opere posizionate in zona di scorrimento o di arresto della valanga; queste, essendo soggette a spinte dinamiche di notevole entità, presentano necessariamente caratteristiche strutturali di notevole resistenza.

Le principali tipologie di opere di difesa passiva sono:

- Opere di deviazione: hanno la funzione di far cambiare la direzione di scorrimento delle valanghe radenti allo scopo di proteggere strutture ben definite (argini di deviazione e deviatori), oppure di dividere la massa della valanga in piccole parti più facilmente controllabili (cunei). A protezione delle strade, si impiegano nella fattispecie gallerie paravalanghe;
- Opere di arresto: vengono utilizzate per bloccare del tutto una valanga in movimento oppure per rallentarne la velocità e ridurre la distanza di arresto (dighe di contenimento o intercettazione);
- Opere di frenaggio: favoriscono la decelerazione della neve in movimento provocandone l'espansione laterale per effetto di deviazioni successive (cunei frenanti).

Quando si verifica un elevato livello di pericolo a seguito di eventi di particolare entità quali forti nevicate, fenomeni di notevole escursione termica oppure presenza di venti forti e persistenti, vengono generalmente applicate due forme di **difesa temporanea**.

La principale consiste nell'evacuazione di edifici e nella chiusura al traffico di strade e piste da sci tramite provvedimenti straordinari delle Autorità competenti in materia di sicurezza.

In casi di conclamata emergenza o qualora previsto da specifici piani d'intervento, è invece possibile intervenire procedendo con il **distacco artificiale** delle valanghe mediante l'utilizzo di materiali esplosivi.

Condizione necessaria per poter formalmente procedere con le operazioni di distacco artificiale è la redazione del Piano d'Intervento di Distacco Artificiale, ovvero PIDA.

Esso è il documento che regola l'intervento degli operatori e deve contenere l'elenco del personale coinvolto nelle operazioni (esaustivo di ogni nota caratteristica) ed i relativi ruoli, i luoghi d'intervento, le norme di sicurezza e di comportamento, i tempi d'intervento e le priorità.

Il distacco artificiale o programmato delle valanghe consente di provocare infatti la rottura del manto nevoso prima che questa si verifichi spontaneamente.

Viene utilizzato mediante l'impiego puntuale e distribuito di materiale esplosivo convenzionale e miscele gassose esplosive.

Questo sistema consente di scegliere il momento più favorevole al distacco, limitando a periodi relativamente brevi l'interdizione delle aree interessate.

Le sollecitazioni meccaniche trasmesse dalla detonazione del materiale esplosivo e la loro propagazione alla superficie del manto nevoso, nonché alle aree immediatamente circostanti, provocano il distacco e quindi la bonifica del pendio con la conseguente messa in sicurezza dei comprensori a valle dell'intervento.

- Variabilità spaziale e temporale della stabilità del manto nevoso

La stabilità del manto nevoso è soggetta a variazioni nello spazio e nel tempo. Tuttavia, mentre la variabilità temporale, che è strettamente legata all'andamento delle condizioni meteorologiche, è intuitivamente più facile da comprendere, la **variabilità spaziale**, non essendo immediatamente percepibile con l'osservazione diretta, è un parametro più subdolo, strettamente connesso alla scala territoriale considerata.

Numerose ricerche effettuate in diverse parti del mondo negli ultimi 20 anni hanno dimostrato in modo inequivocabile che la stabilità spaziale è presente non solo a mesoscala (diversità di quote, esposizioni, pendenze e configurazione dei pendii) ma anche a microscala, a livello cioè di singoli pendii relativamente uniformi.

Mentre a mesoscala ( $10 - 10^2 \text{ km}^2$ ) la variabilità spaziale è strettamente connessa a fattori geomorfologici che determinano le caratteristiche fisiche e meccaniche del manto nevoso, a livello di microscala o di singolo pendio ( $10^2 - 10^3 \text{ m}^2$ ) la variabilità dipende da fattori ancora in parte sconosciuti.

Se pensiamo inoltre che McClung e Schweizer nel 1999 hanno stimato che le dimensioni critiche per la propagazione spontanea delle fratture nel caso del distacco di valanghe a lastroni sono nell'ordine di 0,1 - 10 m, riusciamo forse a mettere meglio a fuoco la complessità di tale problematica.

La **variabilità temporale** della stabilità dipende invece, come già accennato in precedenza, dall'andamento dei parametri meteorologici e dalla loro influenza a microscala sui metamorfismi che determinano le caratteristiche fisiche e meccaniche del manto nevoso.

Benché questa influenza sia ovvia e da sempre considerata nella valutazione del pericolo di valanghe, esistono pochissimi contributi in letteratura che dimostrino l'influenza a breve termine dei vari parametri sulla stabilità del manto nevoso.

Nel distacco programmato di valanghe i due parametri che incidono maggiormente a breve termine sono il cumulo di neve (di precipitazione o

ripresa dal manto nevoso) che incrementa lo spessore del lastrone (e di conseguenza il fenomeno del sovraccarico) e la temperatura dell'aria, la quale influenza direttamente la temperatura del lastrone e quindi la sua durezza.

Sia la variabilità spaziale che quella temporale rappresentano quindi delle importanti chiavi interpretative per capire i meccanismi di distacco delle valanghe e fare previsioni il più possibile accurate.

Appare evidente infatti come, nel distacco programmato delle valanghe, la valutazione della stabilità e della sua variabilità spazio-temporale giochi un ruolo molto importante, anche se non esclusivo, nella determinazione dei punti di tiro (nel caso di utilizzo di sistemi mobili) e del momento di tiro (qualunque sistema venga utilizzato).

- Metodi per la valutazione della stabilità

Tutti i metodi speditivi diretti per la valutazione della stabilità, chiamati test di stabilità, si basano sul principio di isolare un campione di neve e di indurre su questo una forza addizionale di taglio nello strato debole al fine di provocarne la rottura.

Nel tempo sono stati ideati diversi metodi ma il test che è diventato un riferimento imprescindibile, in quanto confortato da dati sperimentali, è il **test del blocco di slittamento**.

Esso si basa sul principio di separare, dal resto del manto nevoso, un blocco di neve di dimensioni prefissate (1,5 – 2,0 m) e di sottoporlo ad una sequenza progressiva di carichi crescenti da parte di uno sciatore.

Il grado del blocco è dato dal valore del livello di carico al quale lo strato debole cede consentendo alla parte superiore del manto nevoso (lastrone) di slittare lungo il pendio sulla rimanente parte che rimane in loco.

Al fine di ovviare alla grande limitazione imposta da questo genere di test, ovvero la poca oggettività nei livelli di caricamento, in Nord America è stato recentemente messo a punto un nuovo test di stabilità chiamato **drop hammer test**.

Dopo aver preventivamente isolato dal manto nevoso un parallelepipedo di neve di 30 x 30 cm, questo viene sottoposto a carichi crescenti di compressione tramite una tavoletta delle stesse dimensioni, dotata di un'asta di guida alta 60 cm, su cui viene fatto scorrere e lasciato cadere da diverse altezze un martello del peso di 1 o 3 kg.

Facendo riferimento ad altezze di caduta del martello fisse di 5, 10, 15 e fino a 55 cm, l'altezza di lancio che determina la rottura di taglio nello strato debole costituisce lo "score" (o grado) del test.

I metodi sopra descritti (quelli cosiddetti "speditivi") sono validi in molti casi pratici ma risultano essere poco oggettivi e comunque assai legati all'esperienza dell'operatore.

Sono state per questo sviluppate altre metodologie empiriche utili allo studio e all'indagine diretta delle caratteristiche del manto nevoso.

Queste prevedono l'utilizzo di strumenti specifici quali pala dinamometrica, penetrometro, driftometro, dinamometro con telaio e, in riferimento a tecnologie di ultimissima generazione, l'impiego di sensori e sistemi georadar.

Molto interessante è il test che permette di calcolare un indice di stabilità del manto nevoso (SI) mediante un'equazione proposta da \*Roch.

Ciò presuppone l'utilizzo di un **telaio di taglio** di 0,01 m<sup>2</sup> con il quale si misura la resistenza al taglio nello strato debole.

$$*SI = (\Sigma_{100} + \sigma_{zz} \Phi) / \sigma_{xz}$$

dove:

$\Sigma_{100}$  è la resistenza dello strato debole misurata con il telaio di taglio,

$\Phi$  è l'attrito statico della neve (che varia con la tipologia dei grani),

$\sigma_{zz}$  è la componente del peso del lastrone perpendicolare al pendio,

$\sigma_{xz}$  è la forza di taglio data da:

$$\sigma_{xz} = \rho g L \sin\psi \cos\psi$$

dove:

L è lo spessore del lastrone (misurato sulla verticale),

$\rho$  è la densità del lastrone,  
 $\psi$  è l'angolo di inclinazione del pendio.

L'indice di stabilità (SI) per distacchi spontanei secondo lo studioso Föhn è dato invece da:

$$SI = (\Sigma_{\infty} + \sigma_{zz} \Phi) / \sigma_{xz}$$

dove  $\Sigma_{\infty}$  è la resistenza di Daniel riferita ad un campione illimitato.

Considerando la sollecitazione indotta da un sovraccarico  $\Delta\sigma_{xz}$ , l'indice di stabilità diventa:

$$SI^1 = (\Sigma_{\infty} + \sigma_{zz} \Phi) / (\sigma_{xz} + \Delta\sigma_{xz})$$

Pertanto si evince come, conoscendo la resistenza a taglio dello strato debole, lo spessore e la densità del lastrone e l'angolo di inclinazione del pendio sia possibile calcolare l'indice di stabilità del manto nevoso (SI); inoltre, conoscendo l'entità di un eventuale sovraccarico, si può ricavare facilmente l'indice di stabilità con sovraccarico ( $SI^1$ ).

Attualmente il test più utilizzato è quello funzionale a delineare un cosiddetto **profilo penetrometrico** del manto nevoso; si tratta di una misura di tipo oggettivo della "durezza" della neve e viene effettuata mediante l'utilizzo di una sonda a percussione (chiamata anche "sonda battage") costituita da un'asta provvista di scala centimetrata e di una punta a cono standard (diametro = 40 mm e angolo alla punta = 60°).

Durante la prova viene fatto cadere un peso per infiggere la punta dello strumento nella coltre nevosa e la resistenza R alla penetrazione si determina mediante la formula:

$$R = T + H + n f p$$

dove:

T è il peso delle aste utilizzate,

H è il peso del maglio usato per l'infissione (in genere pari a 5 o 10 N),

n è il numero di colpi inferti dal maglio in caduta,

$f$  è l'altezza di caduta del maglio in centimetri,  
 $p$  è la penetrazione della punta conica in centimetri.

Un profilo penetrometrico ottenuto da una prova con sonda a percussione si configura come un diagramma a gradini e mostra la resistenza alla sonda,  $R$ , riportata sull'asse delle ascisse in funzione dell'altezza del manto nevoso.

Esso è pienamente rappresentativo della sezione verticale del manto nevoso e ne disegna lo sviluppo, partendo dal piano campagna, fino alla superficie.

Il profilo penetrometrico risulta alla fine essere una delle importanti tessere che costituiscono un mosaico chiamato **osservazione nivometeorologica**: implementato infatti con altri dati quali le coordinate spazio-temporali, le condizioni meteo, la temperatura dell'aria e i dati eolici, la densità e la temperatura della neve nei singoli strati del manto e soprattutto l'attenta osservazione delle forme cristalline presenti in questi, risulta essere lo strumento fondamentale per importanza ed imprescindibile per priorità nella pianificazione di operazioni di distacco artificiale.

Nello studio delle valanghe intervengono, come già accennato in precedenza, alcuni parametri di resistenza meccanica del materiale "neve" (angoli di attrito e coesione) tipici dei materiali a comportamento attritivo (ergo, i terreni).

Il risultato di una prova di taglio effettuata su diversi campioni di neve è, nella stragrande maggioranza dei casi, un involuppo di rottura del tutto analogo a quello dei terreni.

Pertanto, l'idea che è alla base dell'attività di ricerca rivolta alla definizione di una nuova metodologia di previsione di valanghe, è quella di utilizzare su manti nevosi uno strumento di indagine già in uso per i terreni, ovvero già collaudato per la caratterizzazione dei parametri di resistenza e di rigidità di un terreno.

Ciò con lo scopo di realizzare un sistema efficace ed oggettivo di previsione delle valanghe che possa effettuare le misure necessarie a definire il livello di rischio di valanga in modo completamente autonomo ed automatico, e che possa quindi essere collocato a trasmettere dati proprio in quelle aree ove il rischio valanga è elevato.

Lo strumento scelto per procedere in tale tipologia di ricerca è il Dilatometro piatto di Marchetti o **DMT**; esso è costituito da una lama piatta d'acciaio che ha, su una faccia, una sottile membrana d'acciaio deformabile mediante aria compressa, in grado di effettuare una prova di carico orizzontale sul materiale in cui si trova immersa.

In pratica durante la prova, che si effettua con il DMT fermo ad una certa quota sotto il piano di campagna, si rileva il valore della pressione dell'aria che equilibra la pressione totale del terreno contro la membrana ( $p_0$ ) ovvero che inizia a spingere la membrana verso il terreno; a questo punto si rileva il valore della pressione necessaria a spingere la membrana di 1,1 mm verso il terreno ( $p_1$ ).

Ad oggi, nessuna interpretazione dei parametri di resistenza ottenuti con tecnologia DMT è stata ancora tentata; nonostante questo però, elaborando le misure ottenute tenendo conto del peso di volume del "materiale neve", si è dimostrata una notevole sensibilità dello strumento a mettere in luce le variazioni del modulo di rigidezza in funzione della profondità della coltre nevosa.

In parallelo alla prova meccanica "in situ", che restituisce valutazioni di tipo quantitativo, ci si propone di iniziare in futuro ad effettuare prove di prospezione **georadar**.

Questo tipo di indagine, affiancata alle verticali DMT, dovrebbe dare indicazioni riguardo la "leggibilità" delle variazioni di contrasto delle caratteristiche dielettriche della neve che, in sito, si trova in diversi stadi di compattazione.

In questo caso le valutazioni di consistenza sarebbero solo di tipo qualitativo, ma potrebbero essere utili per stimare le altezze dei diversi strati di materiale nevoso accumulato sul terreno, per la stima dei volumi di neve che potrebbero entrare in gioco durante un evento valanghivo spontaneo oppure accidentale, quale quello provocato in operazioni di distacco artificiale.

- Aspetti modellistici di dinamica delle valanghe

A partire dalla metà degli anni '50 sono state avviate, in molti paesi europei ed extraeuropei, ricerche specifiche mirate allo sviluppo di strumenti modellistici di supporto allo studio dei fenomeni di dinamica delle valanghe.

Scopo della modellizzazione è fornire risposte circa il comportamento dinamico di un volume  $V$  di neve dalle caratteristiche conosciute: come si muove, dove si direziona e, di fondamentale importanza per le operazioni di distacco artificiale, dove si arresta e con quale entità di deposito.

A tale scopo sono state elaborate due tipologie di modelli di calcolo, differenti nell'approccio e nelle modalità:

1. Modelli empirici;
2. Modelli deterministici o fisico-matematici.

Mentre i modelli deterministici simulano il moto della valanga considerandone gli aspetti fisici, i **modelli empirici** stimano esclusivamente la distanza d'arresto basandosi sulla registrazione di dati storici relativi a siti valanghivi oggetto di un'adeguata memoria storica.

I modelli empirici, che a loro volta si possono distinguere in comparativi e statistico-topografici, vengono di norma applicati a scorrimenti densi ma, in presenza di un campione di dati qualitativamente sufficiente, potrebbero in linea di principio essere riferiti anche a valanghe di tipo polveroso.

I **modelli deterministici** forniscono invece, come già accennato, informazioni sulle caratteristiche dinamiche del fenomeno quali velocità, altezze di scorrimento e pressioni d'impatto.

Vengono in questo caso utilizzati sistemi di equazioni (generalmente le equazioni di bilancio della meccanica) per tentare di descrivere la fisica del fenomeno e simularne la dinamica a partire dal distacco fino all'avvenuto arresto.

Limitando l'attenzione alle valanghe di tipo denso, maggiormente rilevanti ai fini della mappatura del rischio in quanto più frequenti e dannose rispetto a quelle polverose, i modelli di tipo deterministico si suddividono in due tipologie basate su differenti approcci modellistici:

1. Modelli "ad un grado di libertà" o "di tipo puntuale";
2. Modelli "ad infiniti gradi di libertà" o "di tipo continuo".

Alla base dei modelli "ad un grado di libertà" vi è l'ipotesi sostanziale di poter analizzare la dinamica delle valanghe attraverso lo studio del moto del suo baricentro lungo una traiettoria predefinita, rappresentata dal profilo longitudinale del pendio.

Essi sono così chiamati perché l'unico grado di libertà è rappresentato dall'ascissa curvilinea che definisce in ogni istante la posizione del baricentro lungo la traiettoria nota a priori.

I modelli "di tipo continuo" si basano invece sull'ipotesi di considerare la valanga un continuo monofase, descrivendone il moto con riferimento alle equazioni di bilancio (massa e quantità di moto) che governano la dinamica dei continui deformabili.

Essi quindi consentono, almeno in linea di principio, di valutare l'evoluzione spazio-temporale completa del fenomeno, cioè l'andamento punto per punto ed istante per istante di tutte le grandezze fisiche più significative fornendo una più realistica descrizione della dinamica della valanga rispetto ai modelli puntuali.

L'impostazione completa del problema da un punto di vista matematico richiede la definizione parallela del sistema di equazioni a cui far riferimento e delle leggi costitutive da introdurre in esso.

Le modellizzazioni di tipo continuo storicamente utilizzate corrispondono alle seguenti classi:

- Modelli basati sulle equazioni di Navier-Stokes:

- Modelli newtoniani (Lang 1979, Dent 1980);
  - Modelli biviscosi (Dent 1983).
- Modelli basati su un approccio di tipo integrale (integrazione delle equazioni di bilancio normalmente al pendio):
- Modelli basati sulle equazioni di St.Venant (Grigoryan 1979, Brugnot 1981);
  - Modello integrale norvegese (Norem 1987, 1989);
  - Modelli basati sulle equazioni "delle acque basse" (Martinet 1992, Naaim 1992, Sampl 1993, Ancey 1994, Nettuno 1996, Berthelt 1997, Barbolini 1999).
- Effetti di un'esplosione sul manto nevoso

Risulta a questo punto abbastanza intuitivo comprendere come la struttura del manto nevoso non favorisca la propagazione degli effetti dell'esplosivo.

La neve si comporta in modo tale da "assorbire" quasi tutta l'energia trasmessa dalla detonazione e solitamente gli effetti si limitano alla formazione di un modesto cratere.

Avremo dunque risposte assai diverse a seconda che l'esplosione avvenga all'interno del manto nevoso, sulla sua superficie o in aria.

- **Esplosione all'interno** del manto nevoso

In prossimità del punto di esplosione la neve è soggetta ad un notevole e brusco aumento di pressione causato dai gas, caratterizzati da una temperatura assai elevata.

La neve sarà vaporizzata, frantumata, compressa e proiettata a distanza formando un cratere dai bordi rialzati (creati dal materiale ricaduto).

Il limite invece oltre il quale il manto nevoso rimarrà indisturbato ad una detonazione avvenuta ad una maggior profondità, prende gergalmente il nome di "limite di effetto fumacchio".

Le esperienze condotte da numerosi ricercatori hanno definito le formule per la determinazione delle dimensioni dei crateri in funzione della quantità di esplosivo impiegato e della profondità di tiro:

Cratere massimo  $H = 0,75 W^{1/3}$

Fumacchio  $H = 1,50 W^{1/3}$

dove:

H corrisponde alla profondità in metri di affondamento della carica,

W corrisponde alla massa in kg dell'esplosivo in equivalente TNT.

Un esempio utile per constatare la scarsa efficacia di un'esplosione all'interno del manto nevoso, è simulare l'utilizzo di 1 kg di TNT: nel manto nevoso si sarà formato un cratere profondo 75 cm e l'effetto della detonazione avrà interessato la neve circostante al cratere (zona di frattura e delle deformazioni permanenti) per un raggio massimo di un paio di metri, lasciando sostanzialmente indisturbato il manto.

Qualora volessimo raddoppiare l'effetto dovremmo utilizzare ben 8 kg di esplosivo analogo.....!!!

- **Esplosione sulla superficie** del manto nevoso

Partendo dal fatto che il transito di uno sciatore può essere sufficiente a provocare il distacco di una valanga, Mellor (USA) ed altri ricercatori presero come punto di partenza per i loro calcoli, a metà del secolo scorso, un valore di pressione pari a  $30 \text{ mb/cm}^2$ , equivalente infatti alla pressione media esercitata da uno sciatore sulla superficie del manto nevoso.

Mellor arrivò a redigere un diagramma dal quale si può ad esempio evincere come l'esplosione di 1 kg di TNT sulla superficie della neve provochi un aumento di pressione pari a 30 mb alla distanza di 13,5 m. A parità di carica, l'onda di pressione di un tiro in superficie può interessare un'area molto maggiore rispetto a quella interessata da un tiro in profondità, specie procedendo ad un posizionamento che consideri attentamente l'orografia locale del terreno; una carica interrata si limita semplicemente a formare un cratere nel manto nevoso, generando su di esso una pressione con effetti meccanici marginali ed in valore assolutamente trascurabili.

- **Esplosione al di sopra** del manto nevoso

Un'esplosione in aria crea un'onda di pressione che si propaga sfericamente nel mezzo e che, venendo in contatto col manto nevoso, si arricchisce di una componente riflessa la quale ha come effetto, nelle immediate vicinanze del manto, un aumento del valore di pressione dell'onda primaria.

A parità di carica, l'aumento di pressione che si produce alla superficie della neve varia in funzione dell'altezza del tiro, riducendosi in funzione della distanza dalla proiezione sul suolo del centro dell'esplosione.

Seguendo per esempio una tracciatura sul diagramma di Ingram (USA), si può osservare come la pressione (indicata in bar) alla superficie del manto nevoso risulti progressivamente più elevata se la quota di tiro aumenta sino ad un massimo di 2 m, tornando a ridursi per quote superiori fino ad un valore nullo.

Graficamente è inoltre possibile calcolare ordini di grandezza teorici per determinare il **raggio efficace** della carica, cioè il raggio della superficie circolare che è interessata da un'onda di pressione di valore tale da vincere le resistenze del manto nevoso e provocare artificialmente la rottura dell'equilibrio.

Le dimensioni del raggio efficace aumentano principalmente in funzione del peso della carica e della sua posizione rispetto alla superficie del manto nevoso, nonostante la morfologia del terreno possa influenzare considerevolmente la propagazione delle onde di pressione generate dall'esplosione, siano esse dirette o riflesse.

Prove sperimentali condotte in Francia presso il Cemagref di Grenoble ed aventi come oggetto lo studio degli effetti delle onde sonore sul manto nevoso giudicato in equilibrio critico, non hanno provato alcun nesso causa-effetto tra le due componenti, giustificando come pure coincidenze i testimoniati distacchi di valanghe avvenuti durante il passaggio di mezzi aerei o in occasione di forti rumori.

- Cenni sui criteri di scelta dei materiali esplosivi da utilizzare

Lo scopo particolare a cui è destinato e le gravose condizioni di esercizio in cui viene utilizzato obbligano ad una scelta molto oculata dell'esplosivo da impiegare nell'attività di distacco programmato.

Per meglio scegliere il prodotto che più si adatta alle nostre esigenze di sicurezza ed efficacia è necessario considerare principalmente le seguenti proprietà e caratteristiche:

- Stabilità;
- Resistenza alle basse temperature;
- Resistenza all'acqua;
- Velocità di detonazione;
- Impatto ambientale.

La **stabilità**, cioè l'attitudine di un esplosivo a mantenersi inalterato per un determinato periodo di tempo in normali condizioni di conservazione, è una proprietà importante da valutare qualora, condizione normale per esempio in Nord America, siano presenti riserve dedicate nelle singole stazioni sciistiche.

La **resistenza alle basse temperature**, ovvero alle modificazioni che il freddo può produrre alle caratteristiche di omogeneità dell'esplosivo rendendo il prodotto altamente sensibile o addirittura instabile, è una proprietà che da sola risulta fortemente discriminante nella scelta, assumendo il valore del punto di congelamento come vero e proprio ago della bilancia.

La **resistenza all'acqua**, ovvero al degrado cui è soggetto un esplosivo venendo a contatto con essa, è un altro fattore fortemente discriminante nella scelta del prodotto più adatto, orientando l'attenzione a gomme e gelatine piuttosto che, per esempio, ad esplosivi pulverulenti.

In via del tutto teorica, per il distacco artificiale di valanghe, sarebbero preferibili esplosivi con una **velocità di detonazione** compresa tra 1000÷2000 m/s perché, usando esplosivi più "veloci", buona parte dell'energia viene dissipata in perdita.

Nell'utilizzo pratico siamo però di fronte ad una strada non percorribile in quanto gli esplosivi caratterizzati da velocità di detonazione più modeste (come ad esempio ANFO e pulverulenti) non sono idonei all'impiego in presenza di acqua o risultano essere poco sensibili all'innesco alle basse temperature.

Per di più, esplosivi binari appositamente sviluppati e commercializzati per questo impiego specifico come il Nitroroch e il Titabex C della francese Nitrochimie, sono vietati dalle vigente legislazione italiana.

Pertanto, a causa della loro spiccata adattabilità alle severe condizioni ambientali, sul nostro territorio nazionale si ricorre principalmente a gomme e gelatine, nonostante l'imperfetto accoppiamento della velocità di detonazione con il mezzo neve; l'energia dissipata viene in questo caso compensata dimensionando per eccesso e a costi contenuti la carica esplosiva.

Ultime per ordine ma non di certo per importanza, le caratteristiche di un esplosivo legate **all'impatto ambientale** provocato dal suo impiego rivestono oggi un argomento sempre più "sensibile", specie nei paesi particolarmente votati al rispetto della natura per tradizione e cultura.

L'utilizzo in ambiente montano, spesso all'interno di parchi naturali ed oasi protette, impone infatti di impiegare prodotti in contenitori biodegradabili e che

non producano schegge, che siano a bassa tossicità e che non creino possibilmente depositi carboniosi sul manto nevoso.

- Conclusione

Con i cenni sui criteri di scelta dell'esplosivo sopra riportati si considera conclusa l'analisi dei due differenti scenari d'intervento presi in esame.

Come già espresso in premessa, si è voluto focalizzare l'attenzione sulla caratterizzazione del mezzo da abbattere, analizzando le procedure di tipo attivo alle quali è possibile ricorrere per una corretta e sicura gestione degli interventi mediante l'utilizzo di materiali esplosivi.

Si è optato per dare alla trattazione un taglio decisamente inusuale, preferendo tralasciare analisi di natura strettamente esplosivistica a favore di uno studio più approfondito della genesi delle problematiche, con l'obiettivo di acquisire strumenti utili per la corretta esecuzione di scelte, siano esse tecniche che economiche.

Un sentito ringraziamento è doveroso nei confronti dell'SLF Institute di Davos, del Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels e del Servizio Valanghe Italiano; in particolar modo si ringraziano gli amici Renato Cresta, Massimiliano Barbolini, Mauro Valt, e Betty Sovilla i quali, attraverso il loro contributo didattico e bibliografico, hanno reso possibile la realizzazione di questo elaborato.