

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Efficienza di sistemi per il distacco artificiale di valanghe di neve

Relatore:

Prof.ssa Barbara Frigo

Correlatore:

Prof.ssa Marilena Cardu

Candidato:

Dario G. A. Squillace S237022

Dicembre 2019



Indice

Introduzione	4
Capitolo 1. Neve e valanghe, aspetti teorici	6
1.1 Premessa	6
1.2 Le valanghe nella storia (eventi e statistiche)	6
1.3 Il rischio valanghe	10
1.4 Mitigazione del rischio e tecniche di intervento	11
1.4.1 Misure di protezione permanente	11
1.4.2 Misure di difesa temporanea	14
1.5 La neve ed il manto nevoso	15
1.5.1 Metamorfismo da gradiente debole	17
1.5.2 Metamorfismo da gradiente elevato	18
1.5.3 Metamorfismo per fusione e rigelo	18
1.5.4 Metamorfismo meccanico	19
1.6 Le valanghe	20
1.6.1 Area di distacco	21
1.6.2 Zona di scorrimento	22
1.6.3 Zona di accumulo	22
1.6.4 Classificazione delle diverse tipologie di valanghe	23
Capitolo 2. Tecniche per il distacco artificiale di valanghe	29
2.1 Premessa	29
2.2 Vantaggi, svantaggi e rischi correlati	30
2.2 Distacco manuale	32
2.3 Artiglierie	33
2.3.1 Avalancheur	33
2.3.2 Lanciarazzi	34



2.3.3 Sistema WLS (Wyssen Lawinene Sprengmast)	35
2.4 Brillamento da mezzo aereo	36
2.5 Distacco a distanza (il Ca.T.Ex)	38
2.6 Sistemi con miscele gassose esplosive	39
2.6.1 Gazex®	40
2.6.2 Avalhex	44
2.6.3 Daisybell	46
2.6.4 O'bellx	49
2.7 APR SNIPER	51
Capitolo 3. Esplosione ed effetti sulla neve indotti dall'esplosione	53
3.1 Premessa	53
3.2 L'esplosione ed i suoi effetti	53
3.2.1 Detonazione e deflagrazione	55
3.3 Gli esplosivi	58
3.3.1 Polvere nera	59
3.3.2 Esplosivi al Nitrato d'Ammonio (NH₄NO₃)	60
3.3.3 Esplosivi gelatinati	62
3.3.4 Esplosivi contenenti acqua	63
3.3 Effetti dell'esplosione sul manto nevoso	66
3.3.1 Trasmissione dell'onda d'urto e concetto di impedenza (Z)	67
3.4 Effetti dell'esplosivo sul manto nevoso in funzione del suo posizionamento	72
3.4.1 Posizionamento della carica nel manto nevoso	72
3.4.2 Carica appoggiata in superficie	75
3.4.3 Carica sospesa	77
Capitolo 4. Modello per l'innescò di valanghe di neve	83
4.1 Equilibrio del manto nevoso	83



4.1.1 Perdita di resistenza per cedimento dello strato fragile	85
4.1.2 Aumento della sollecitazione per eventi naturali	86
4.1.3 Aumento di sollecitazione per eventi accidentali o volontari	87
4.1.4 Stato tensionale all'interno del manto nevoso	89
4.2 Modello “Shear lag” applicato all'innesco delle valanghe a lastroni	90
4.2.1 Stabilità del manto nevoso	91
4.2.2 Distacco spontaneo	92
4.2.3 Criterio di innesco tensionale	96
4.2.4 Criterio di innesco energetico	97
4.2.5 Criterio di innesco accoppiato	98
4.2.6 Applicazioni dei criteri di rottura	99
4.3 Applicazione al distacco artificiale	101
4.3.1 Criterio di innesco tensionale	102
4.3.2 Criterio di innesco energetico	103
Capitolo 5. Applicazione del modello, risultati e considerazioni conclusive	105
5.1 Premessa	105
5.2 Sovrappressione generata dall'esplosione in funzione della distanza	105
5.2.1 Calcolo del TN_{Teq}	107
5.2.3 Raggio di influenza (applicazione del criterio tensionale)	108
5.3 Criterio energetico	111
5.3.1 Applicazione in neve fortemente metamorfosata (cornici e ponti di neve)	122
5.4 Considerazioni conclusive	124
Bibliografia	130



Introduzione

La presenza di attività antropiche in zone montane comporta una serie di situazioni di pericolo dovute a diversi fenomeni naturali, quali crolli di roccia o distacchi di masse nevose. Questi eventi naturali, ogni anno, provocano diversi morti ed ingenti danni alle strutture: per questo motivo è importante conoscere e capire quale sia l'entità del pericolo e del rischio associato a tali fenomeni in modo da pianificare ed attuare gli interventi necessari per la mitigazione del rischio ed il contenimento dei danni ad essi correlati.

Negli ultimi anni, il distacco artificiale di valanghe effettuato in maniera preventiva, e quindi agendo ancor prima che avvenga un innesco spontaneo, incontrollato ed imprevedibile, è stato oggetto di crescente impiego, sia per motivi strettamente economici, sia per i vantaggi che comporta rispetto alla realizzazione di strutture di protezione, sia per l'ottima operatività, che consente una riduzione del rischio nei territori che ne fanno uso.

L'elaborato si pone l'obiettivo di analizzare alcune caratteristiche dei principali sistemi di distacco preventivo di valanghe per poter successivamente effettuare un confronto tra essi, al fine di valutare la loro applicabilità in termini di efficienza (teorica), con lo scopo di fornire un'indicazione sulla scelta della miglior tipologia di sistema in base alle condizioni del manto nevoso ed allo scenario operativo.

La tesi tratta, in sequenza: un'ampia ricerca bibliografica, brevi considerazioni sul rischio valanghivo in ambienti montani, gli aspetti teorici inerenti la formazione del manto nevoso, la descrizione dei principali sistemi di protezione attiva e passiva, la descrizione dei principali sistemi di distacco artificiale di valanghe.

Inoltre, facendo riferimento al modello *energetico-tensionale* per il distacco artificiale delle valanghe di neve (Cardu et al, 2007) si è potuto svolgere un confronto, in termini di efficienza, fra varie tipologie di esplosivi utilizzati per il distacco di valanghe, sulla base dei dati disponibili in letteratura e sulle schede tecniche messe a disposizione dai costruttori.

Considerando il criterio tensionale ed il valore di TNT equivalente, competente a ciascun esplosivo ed ai sistemi Gazex ed Avalhex, si è valutato il raggio di azione, inteso come distanza massima per la quale si ottiene una sovrappressione, indotta dall'esplosione, pari a 30 mb. Per il criterio energetico è stata valutata la trasmissione dell'onda d'urto all'interno



del manto nevoso, ottenendo alcune equazioni che forniscono il valore dell'energia trasmessa in funzione della densità della neve, quindi del grado di metamorfismo cui è soggetta.

In conclusione si è osservato che, dal punto di vista del raggio efficace, non emerge una netta distinzione tra i diversi esplosivi, diversamente a quanto riscontrato circa l'efficienza di trasmissione dell'onda d'urto all'interno del manto nevoso: infatti, gli esplosivi deflagranti, avendo valori di impedenza prossimi a quelli della neve, garantiscono migliori prestazioni sul manto nevoso rispetto agli esplosivi detonanti; si sono dedotte inoltre alcune considerazioni sul posizionamento della carica per massimizzare gli effetti dell'esplosione sulla neve ed aumentare la probabilità di innesco della valanga.

Non è stato possibile svolgere un vera e propria campagna sperimentale, per questo motivo tutte le elaborazioni e le considerazioni fatte sono frutto di ricerca bibliografica e di calcoli svolti utilizzando opportune formulazioni empiriche.



Capitolo 1. Neve e valanghe, aspetti teorici

1.1 Premessa

Prima di procedere con la spiegazione delle metodologie per il distacco artificiale e le elaborazioni successive, si ritiene opportuno riportare, in via del tutto introduttiva all'argomento, una serie di informazioni relative al rischio valanghe ed alcuni aspetti teorici riguardo la formazione del manto nevoso e le caratteristiche dello stesso.

1.2 Le valanghe nella storia (eventi e statistiche)

Le valanghe rappresentano un rischio che ha da sempre caratterizzato ed influenzato la vita della gente di montagna, infatti ogni accadono incidenti con conseguenze molto spesso mortali per le persone coinvolte, oltre a causare ingenti danni economici all'interno delle località colpite.

Gli scenari in cui tali eventi si sono verificati, nel corso della storia dell'umanità, risultano essere molteplici e profondamente diversi in funzione del periodo storico in cui sono accaduti.

Sin dall'antichità si ha memoria, grazie a testimonianze scritte, di eventi particolarmente distruttivi che hanno fortemente influenzato la vita all'interno dei villaggi dei popoli alpini o più in generale montani:

- 1601, Francia, villaggio di Chèze e Saint Martin (Pirenei), 107 vittime
- 1827, Svizzera, Selkingen e Biel 52 vittime
- 1836, Val Belluna (Bl), febbraio\marzo, 24 vittime
- 1836, 28 marzo, Case di Sopra, Valgerola (SO) 48 vittime
- 1888 Valprato Soana (TO), 8 vittime in abitazione

In tempi relativamente più vicini ai giorni nostri, gli eventi mortali avvenuti in ambiente montano, riguardarono contesti territoriali come per esempio, vie di comunicazione e costruzioni di grandi opere, tra i quali è possibile citare:

- 1904, valanga del Beth (val Chisone, TO) 90 minatori coinvolti e travolti da una valanga tra i quali si registrarono 81 vittime
- 1908, Goppenstein, 11 morti durante la realizzazione della linea ferroviaria

- 1917 Svizzera, Drusatsha Davos, 10 vittime persero la vita a causa di una valanga che travolse un treno

In periodi di guerra fenomeni valanghivi coinvolsero i soldati impegnati al fronte, in particolare si fa riferimento al periodo di dicembre del 1916, in cui incessanti nevicate causarono un numero straordinariamente elevato di valanghe, che causarono migliaia di decessi sia tra i soldati che tra i civili.

In particolare ci fu un giorno, il 13 dicembre 1916, ricordato come la “Santa Lucia Nera”, in cui una nevicata straordinaria, causò sin dalle prime luci dell’alba, un elevato numero di valanghe in tutto l’arco alpino sud-orientale.

In particolare, sulla Marmolada nel campo austro-ungarico del Gran Poz (2242 m s.l.m.), circa 300 persone persero la vita a causa di una valanga partita dal ghiacciaio sovrastante.



Figura 1.1- soldati austriaci scavano nella neve in seguito alla valanga del Gran Poz. Fonte: “fassafront.com”

A questo tragico evento, seguì una settimana di intense nevicate, causate da una massa di aria calda e umida proveniente dal mediterraneo, la quale fece registrare un numero di vittime senza precedenti in tutto il periodo invernale, che alcune fonti stimano intorno le 10000 vittime.

In periodi più recenti, considerando gli ultimi 30 anni, ed i paesi del centro Europa, le vittime da valanghe mediamente all’anno risultano essere un centinaio, numero che scende a venti considerando solo la nostra nazione.

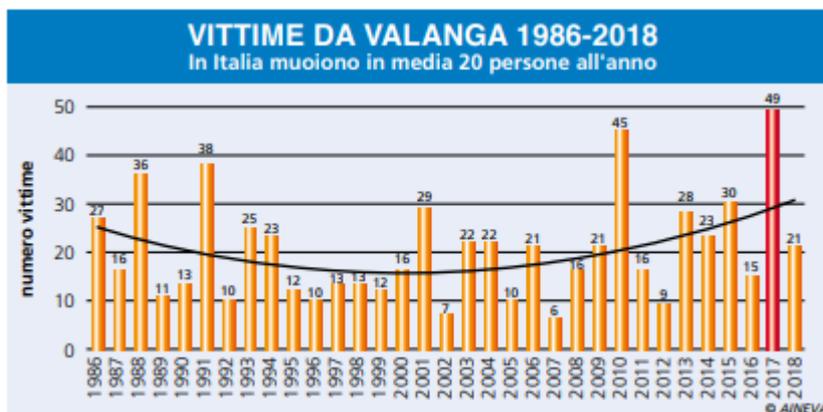


Figura 1.2-vittime da valanghe in Italia. Fonte: “Praolini et al.-2019”

Gli scenari in cui tali incidenti si verificano sono profondamente diversi rispetto al passato, infatti gli incidenti mortali sono sempre di più correlati con discipline sportive di montagna, tra le quali i soggetti maggiormente coinvolti sono i praticanti di discipline “fuori pista” come sciatori ed alpinisti, con una percentuale intorno all’80% sul totale delle vittime annue.

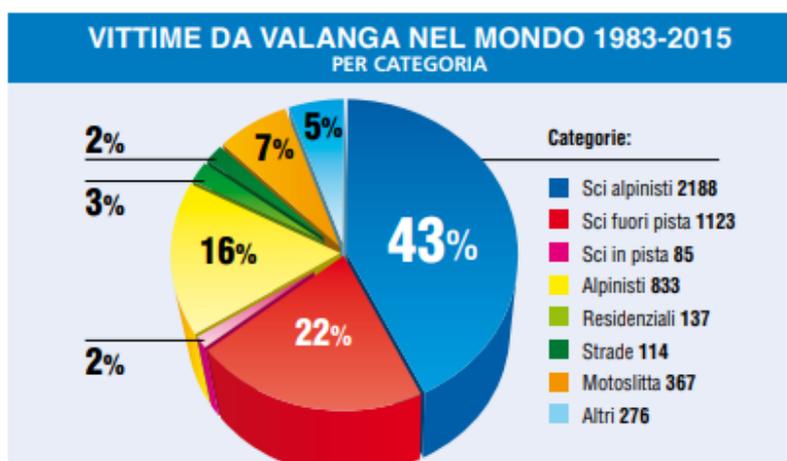


Figura 1.3-vittime per categoria. Fonte: “Praolini et al.-2019”

Le statistiche, a dimostrazione di ciò, evidenziano due trend diametralmente opposti, difatti, a partire dagli anni 70, si è assistito ad una diminuzione degli incidenti e delle vittime in zone controllate (comprensori sciistici, centri abitati, vie di comunicazione), da imputare certamente ai grandi investimenti effettuati in opere di protezione permanenti, ed al sempre più utilizzato distacco preventivo indotto artificialmente, grazie all’utilizzo dell’esplosivo e di miscele di gas.

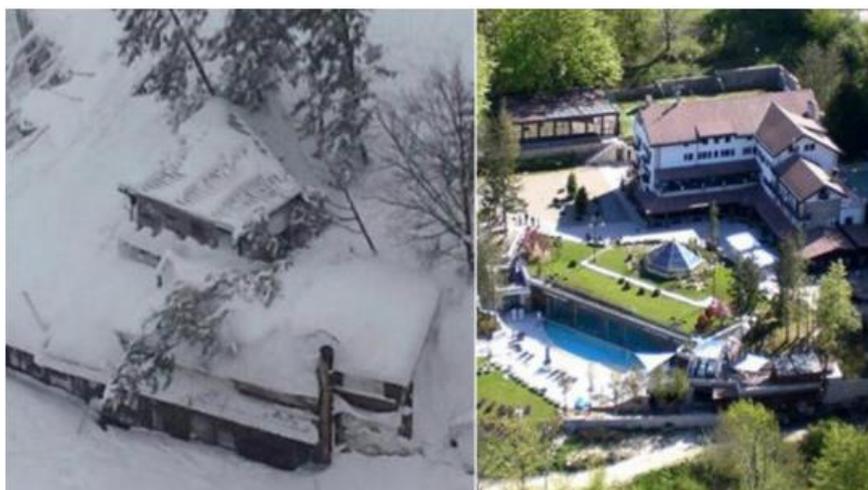
E' invece raddoppiato soprattutto a partire dagli anni 60, anni coincidenti con il boom turistico montano, il numero delle vittime in zone non controllate, tra le quali si distinguono escursionisti, alpinisti e sciatori fuori pista, tale numero però, nonostante il continuo aumento di soggetti praticanti tali tipologie di attività sportive, si è attestato allo stesso livello dei primi anni 70, grazie ai miglioramenti ed alla nascita dei servizi di previsione, ai dispositivi ARTVA (Apparecchi di Ricerca dei Travolti in VALanga) e dell'autosoccorso.

E' per questo motivo perciò, che il numero di vittime da valanga annuali, all'interno dei paesi del centro Europa, si attesta ad una media annuale intorno a 100.

Quanto appena detto è ovviamente valido in via del tutto generale, infatti è il risultato di una media su una numerosità di accadimenti molto variabile di anno in anno, evidenza di una statistica fortemente influenzata dalla nevosità dell'anno preso in considerazione, anni con nevosità maggiori registrano ovviamente un numero di vittime molto più elevato.

Tra i tragici eventi accorsi negli ultimi 30 anni si citano:

- 23 febbraio 1999, Galtuer, Austria 31 vittime in abitazioni e 26 feriti
- 18 gennaio 2017, località di Rigopiano del Comune di Farendola (Pe), distruzione hotel “Rigopiano-Gran Sasso Resort”, valanga innescata da serie di eventi sismici, causa 29 vittime.



**Figura 1.4-Hotel Rigopiano-Gran Sasso
Resort, dopo e prima della valanga.
Fonte: “agi.it”**



1.3 Il rischio valanghe

Nelle aree montane maggiormente esposte a fenomeni valanghivi è fondamentale quantificare il rischio ad essi correlati, in modo da poter individuare i diversi scenari di emergenza che potrebbero verificarsi e, di conseguenza, pianificare al meglio le azioni più idonee di difesa, atte a limitare ed a contenere i danni.

Quantificare il rischio è una fase di cruciale importanza e non priva di difficoltà; è possibile infatti, che tale rischio venga quantificato in maniera non corretta comportando una non esaustiva identificazione e quantificazione di tutti i fattori di pericolo ed il rischio ad essi correlato, causando una sottostima del rischio effettivo ed una pianificazione errata delle possibili azioni di mitigazione.

Il rischio, perciò, necessita di essere quantificato e definito da criteri oggettivi e non deve essere basato su elementi soggettivi, variabili da persona in persona, le quali possono essere più o meno influenzate diversamente da fattori esterni, come per esempio la diversa esperienza o la diversa capacità di cogliere aspetti più o meno importanti.

Per esprimere correttamente il rischio è inoltre necessario individuare ed avere una completa conoscenza di tutti gli elementi vulnerabili in modo da poter, successivamente, assegnare a ciascun elemento esposto un valore del rischio stimato tramite la seguente relazione (1.1):

$$R = P \cdot V \cdot E \quad (1.1)$$

Nella quale i termini che contribuiscono alla definizione del rischio indicano rispettivamente:

- **P**, la pericolosità, definita come la probabilità di occorrenza in un dato luogo ed in un determinato periodo di tempo di un evento con una determinata intensità. La pericolosità è indipendente dalla presenza di beni o di persone in quel determinato contesto e si indica in genere in funzione del tempo di ritorno
- **V**, la vulnerabilità, quantificazione del grado di perdita atteso su un certo elemento, o su gruppi di elementi esposti al fenomeno, in questo caso quello valanghivo. La vulnerabilità è funzione sia dell'intensità del fenomeno e sia della tipologia degli



elementi esposti al rischio, in quanto essa dipende dalle caratteristiche dell'elemento intesa come la capacità di resistere all'evento.

- **E**, l'esposizione, quantificazione del valore degli elementi a rischio, inteso sia come valore economico che come perdita di vite umane.

Il prodotto dei termini **V** ed **E** identificano il danno probabile associato ad un determinato fattore di pericolo. Il rischio così formulato, permette di poter identificare un fattore di pericolo come “dannoso” nel momento in cui esso interferisca con il territorio, le persone e le attività antropiche.

E' infatti possibile che alcune aree soggette a frequenti ed intensi fenomeni valanghivi vengano identificate come aree non a rischio semplicemente a causa dell'assenza di elementi vulnerabili, per cui il verificarsi di un fenomeno valanghivo, in suddette aree, non può comportare danno in alcun modo nè all'uomo e neanche alle sue attività. In queste zone la pericolosità sarà certamente elevata ma con conseguente rischio nullo.

1.4 Mitigazione del rischio e tecniche di intervento

Per ridurre il rischio in zone caratterizzate da elevate probabilità di accadimento, per cui contraddistinte da elevati indici di pericolosità, si può operare secondo due diversi concetti di protezione, ovvero:

- Misure di protezione permanenti
- Misura di protezione temporanee

1.4.1 Misure di protezione permanente

Le misure di protezione permanente dalle valanghe, prevedono l'installazione o la costruzione di opere strutturali, installate a seconda degli scopi, in diversi punti strategici delle zone a rischio.

La differenza sostanziale tra le diverse tipologie di opere di difesa permanente riguardo lo scopo, o meglio la fase in cui tali opere svolgono la loro funzione di mitigazione del danno provocato dallo scorrimento della valanga, o di prevenzione agendo sulle condizioni che ne favorirebbero lo scorrimento.

Per questo motivo opere di protezione permanente si distinguono in:

- Opere di difesa attiva dalle valanghe, tra le quali è possibile distinguere quelle tipologie di opere che agiscono sulle condizioni che favoriscono lo sviluppo delle valanghe, per cui agiscono in maniera preventiva e quindi prima che la valanga si formi ed inizi a scorrere.
- Opere di difesa passiva, ovvero quelle costruzioni o dispositivi installati con lo scopo di mitigarne gli effetti, una volta che la mobilitazione della massa nevosa verso valle sia avvenuta.

Considerando la prima tipologie di opere definite in precedenza, queste sono realizzate in funzione del fattore favorevole alla formazione delle valanghe, su cui agiscono limitandone gli effetti, per cui si distinguono:

- Opere che modificano le condizioni del suolo, queste possono essere, per esempio terrazzamenti o rimboschimenti della superficie, in modo da agire preventivamente sullo slittamento del manto nevoso, aumentando la rugosità del suolo o diminuendone l'acclività.
- Installazione di restrelliere, reti o ponti da neve, strutture in legno o in metallo, con lo scopo di trattenere il manto nevoso evitandone, preventivamente, lo scorrimento.



Figura 1.5-Reti metalliche
Fonte: “Praolini et al.-2019”

- Controllo e limitazione della formazione di cornici di neve, in zone particolarmente critiche, attraverso l'installazione di barriere frangivento e deflettori con lo scopo di modificare il flusso del vento.



Figura 1.6-Barriere frangivento
Fonte: “Praolini et al.-2019”

Per quanto riguarda la seconda tipologia di misure di difesa, queste intervengono nel momento in cui la valanga è in atto, limitando i danni che potrebbero derivare in mancanza dell’opera o deviandone il percorso proteggendo eventuali obiettivi sensibili, posti a valle di essa.

Le opere di difesa passiva, dal momento che devono far fronte allo scorrimento della valanga, venendo quindi investiti dalla stessa, devono essere in grado di poter resistere alle elevate sollecitazioni derivanti da essa. Per questo motivo spesso, sono opere murarie massicce di grandi dimensioni, inseriti in punti strategici.

Le principali opere di difesa passiva dalle valanghe sono:

- Opere di deviazione, hanno la funzione di modificare a direzione di scorrimento della valanga, in modo da proteggere strutture sensibili a valle, oppure intervengono in modo da poter suddividere la massa nevosa trasportata dallo scorrimento della slavina, con lo scopo di ottenere masse di neve più piccole e più facilmente controllabili. Altre opere di deviazione sono le gallerie paravalanghe, costruite su strade o ferrovie in modo da evitare l’interferenza della valanga con le vie di comunicazione.



Figura 1.7 -Cuneo deviatore
Fonte: “Praolini et al.-2019”



Figura 1.8 -Gallerie paravalanghe
Fonte: “Praolini et al.-2019”

- Opere di arresto, sono costruzioni capaci o di bloccare definitivamente la valanga in movimento, oppure di ridurre la velocità consentendo l'esaurimento del fenomeno entro distanze più brevi.
- Opere di frenaggio, consentono l'espansione laterale della valanga in modo da favorirne la decelerazione, grazie all'installazione di deflettori in serie.



Figura 1.9 -Cunei frenanti e diga di arresto
Fonte: “Praolini et al.-2019”

1.4.2 Misure di difesa temporanea

Tali misure si esplicano in provvedimenti o azioni eseguite tramite interventi puntuali, esercitati nel momento in cui vi siano condizioni, per esempio, climatiche o di stabilità del manto nevoso che identificano condizioni di pericolo elevato ed imminente in zone a forte rischio valanghe.



Queste tipologie di intervento, consistono in evacuazioni di edifici, chiusure di strade o di comprensori sciistici in seguito alla segnalazione di condizioni di elevato pericolo. Tali misure possono essere emanate o dalle autorità competenti o dai sindaci dei comuni interessati, che emana ordinanze di chiusura o evacuazione preventiva, avvalendosi della Commissione Locale di Valanghe.

La Commissione Locale Valanghe è un organo competente in materia di rischio valanghe, istituito e previsto in alcune Regioni e Province autonome italiane.

Tale organo ha il compito di fornire, a seguito di opportune verifiche climatiche e di stabilità del manto nevoso, pareri tecnici al Sindaco, o ad altre autorità decisionali, in modo da poter coadiuvare quest'ultimi nella decisione corretta delle eventuali misure di difesa da adottare.

Altri provvedimenti temporanei, prevedono l'utilizzo dell'esplosivo o di dispositivi in grado di far esplodere miscele di gas sul manto nevoso, inducendo un distacco preventivo e controllato delle valanghe.

Nelle regioni in cui tale organo non è previsto, la legge italiana sulla Protezione Civile, una Commissione di Protezione Civile in materia di valanghe, organo consultivo e operativo diretto dal Sindaco al quale aspetta il potere decisionale di intervento.

Tali misure però, possono essere eseguite solo nel momento in cui esse siano previste da specifici piani di intervento.

I piani di intervento, definiti tramite l'acronimo P.I.D.A.V. (Piani di Intervento di Distacco Artificiale delle Valanghe), sono dei documenti elaborati in seguito ad accurati studi di fattibilità e pianificazione di tali interventi, ed hanno lo scopo di regolare le operazioni.

1.5 La neve ed il manto nevoso

A seguito di un evento meteorico di carattere nevoso, la neve inizia ad accumularsi sul terreno e comincia, fin da subito, a manifestare cambiamenti strutturali al suo interno, ciò fa sì che si creino diversi strati di neve con caratteristiche più o meno omogenee.

I fattori che inducono tale stratificazione possono essere ricondotti a due diversi fenomeni, ovvero: la successione temporale di diversi eventi meteorici sotto differenti condizioni meteorologiche differenti ed alla presenza del vento, che può causare il trasporto e quindi

lo spostamento di significative masse nevose accumulandole e modificandone le caratteristiche morfologiche.

I meccanismi di metamorfismo del manto nevoso possono essere suddivisi in quattro diverse categorie:

- Metamorfismo da gradiente debole
- Metamorfismo da gradiente elevato
- Metamorfismo da fusione e rigelo
- Metamorfismo meccanico

Con gradiente, si intende il gradiente termico all'interno del manto nevoso, calcolato come il rapporto tra la differenza di temperatura tra due punti presi all'interno del manto stesso in direzione verticale, e la distanza tra di essi (1.2).

$$\nabla [^{\circ}\text{C}/\text{cm}] = \frac{\text{Temp (A)} - \text{Temp (B)}}{h} \quad (1.2)$$

La neve risulta essere un buon materiale isolante, per questo motivo, soprattutto per manti nevosi più spessi, la temperatura in prossimità del suolo si mantiene prossima agli 0 °C , mentre in superficie varia in funzione della temperatura dell'aria.

Di seguito si riportano i valori limite per ciascuna tipologia di gradiente:

- Debole gradiente: $\nabla \leq 0,05 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{cm}$
- Medio gradiente: $0,06 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{cm} \leq \nabla \leq 0,19 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{cm}$
- Elevato gradiente: $\nabla \geq 0,2 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{cm}$

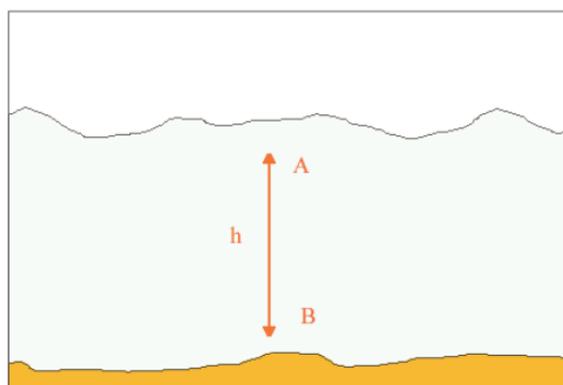


Figura 1.10 -Determinazione del gradiente termico
Fonte: “Chiaravalloti L. E.- 2006”

In seguito verranno descritti in maniera sintetica le quattro diverse tipologie di metamorfismo del manto nevoso.

1.5.1 Metamorfismo da gradiente debole

In condizioni di basso gradiente, prossimo a zero, si parla anche di condizione di metamorfismo isotermico.

Sotto questa condizione, il vapore migra verso l'alto riempiendo le cavità tra i cristalli di neve, ciò causa un arrotondamento delle punte dei cristalli di neve facendo sì che, nel contempo, aumentino i punti di contatto tra i cristalli e di conseguenza la stabilità.

Tale gradiente termico innesca un fenomeno di metamorfismo che può durare anche alcune settimane, causando una riduzione dello spessore del manto nevoso del 15\20 %, nelle prime 24 ore, fino a ridurlo anche di 2/3 rispetto allo spessore della neve fresca, con temperature di circa -3 °C.

Più la temperatura è bassa minore sarà la sinterizzazione, ovvero la capacità dei cristalli di neve di compattarsi ed aderire tra di loro.

Questo tipo di metamorfismo, viste le considerazioni precedenti, fa sì che il manto nevoso aumenti sensibilmente la sua densità.

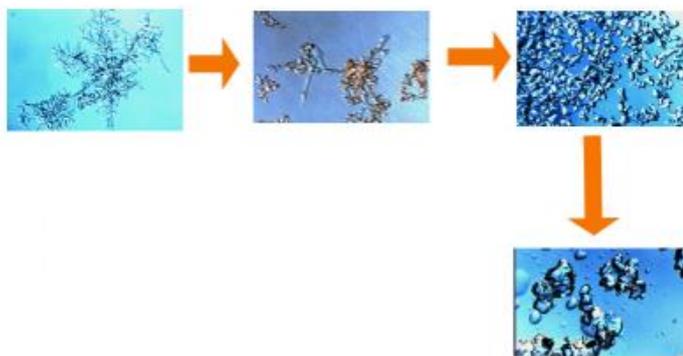


Figura 1.11 – Cristalli di neve soggetti a metamorfismo isoterma
Fonte: “scialp.it”

1.5.2 Metamorfismo da gradiente elevato

A differenza della prima tipologia di metamorfismo, in questo caso, oltre alla migrazione del vapore verso l'alto, si aggiunge anche un flusso verticale di umidità guidato dalla massa d'aria presente in profondità, la quale risulta essere più calda rispetto a quella in superficie.

Questo fa sì che si vengano a formare cristalli di ben più grosse dimensioni dalla tipica forma piramidale cava, caratterizzati da una resistenza pressochè nulla.

Questa tipologia di cristalli è caratterizzata, da elevata porosità e scarsa coesione; ciò comporta frequenti e bruschi movimenti di assestamento degli strati superiori per sovraccarico.

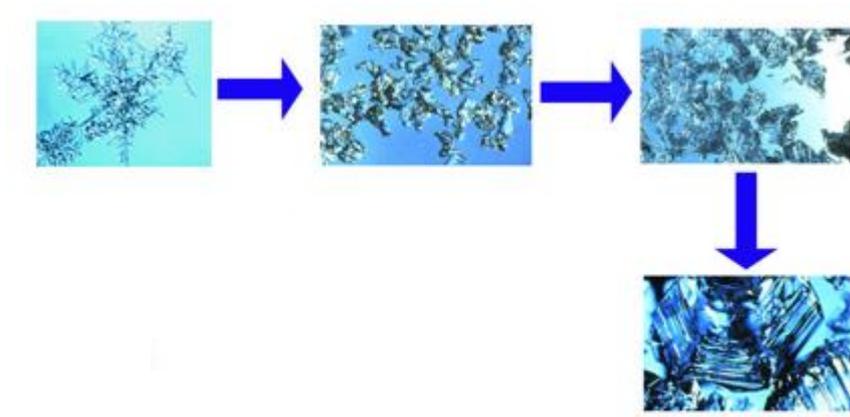


Figura 1.12 – Cristalli di neve soggetti a metamorfismo ad elevato gradiente
Fonte: “scialp.it”

1.5.3 Metamorfismo per fusione e rigelo

Il metamorfismo per fusione e rigelo avviene nel momento in cui la temperatura del manto nevoso o della sua superficie oscilla tra valori di poco superiori il punto di fusione a valori inferiori a 0 °C, in modo tale da permettere alla neve di sciogliersi e di ricongelarsi.

La fusione del manto nevoso può avvenire negli strati più superficiali, in questa zona si ha la presenza di poca acqua negli spazi vuoti tra i cristalli, ciò causa la formazione di un sottile strato liquido intorno ad essi, dando origine alla neve umida.

Nel caso in cui, invece, l'acqua sia maggiormente presente all'interno degli spazi interstiziali tra i grani, si innesca un moto discensionale, un vero e proprio percolamento dell'acqua tra gli spazi vuoti che porta alla formazione di neve bagnata.

Il processo di percolazione dell'acqua da origine ad una coesione tra i diversi grani per capillarità, fenomeno simile alla capillarità interstiziale all'interno di terreni granulari saturi.

Per quanto riguarda la formazione delle valanghe sotto queste condizioni di metamorfismo per fusione, se il manto nevoso avesse un tenore di acqua abbastanza elevato (si assume un valore discriminante pari al 15%), si annullerebbe ogni forma di aggregazione dando origine a fenomeni valanghivi di neve bagnata a debole coesione.

Come espresso in precedenza, la temperatura del manto nevoso, soprattutto in periodi primaverili, può scendere nuovamente al di sotto del punto di fusione innescando così un processo di ricongelamento della neve, causando un inspessimento dei grani dando luogo ad una coesione per rigelo.

Il metamorfismo per rigelo, è tipico dei periodi primaverili ed, in genere, il risultato finale è un manto nevoso caratterizzato da grani più grossi di circa 1 *mm* di diametro.

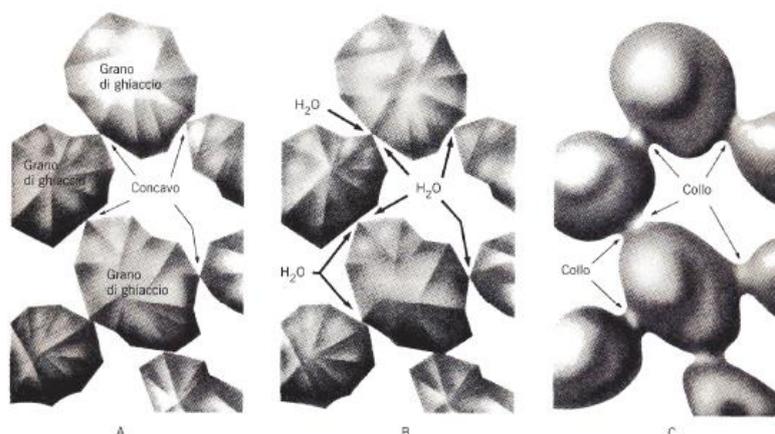


Figura 1.13 – Metamorfismo per fusione e rigelo
Fonte: “McClung & Schaerer-2000”

1.5.4 Metamorfismo meccanico

Il metamorfismo meccanico è dovuto sostanzialmente all'azione spazzatrice del vento, il quale modifica la forma dei cristalli di neve agendo sugli strati più superficiali del manto nevoso.

L'azione del vento sul manto nevoso fa sì che si instaurino diversi processi di trasporto del vento, il tipo di processo dipende dalla forma dei cristalli ed, in particolare, dalla velocità del vento.

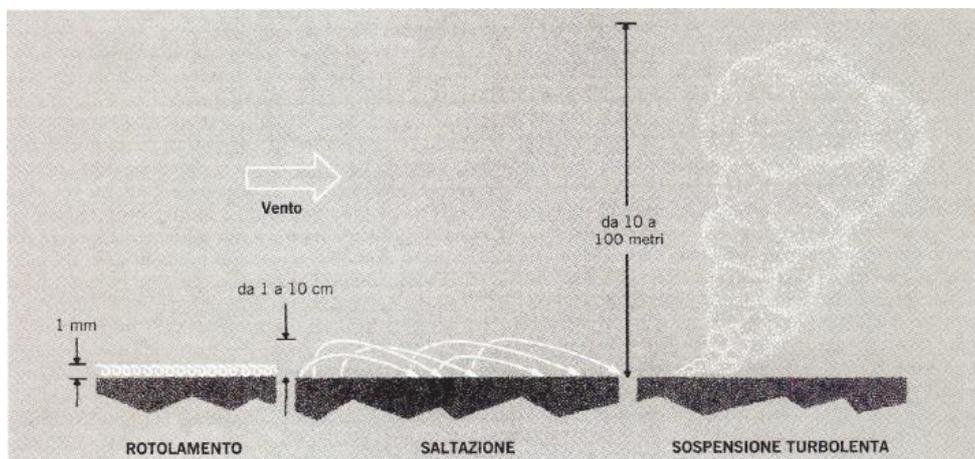


Figura 1.14 – Metamorfismo di trasporto a causa del vento
Fonte: “McClung & Schaerer-2000”

Il vento provoca la rottura delle ramificazioni dei cristalli, generando una fine polvere ghiacciata. La neve così generata viene definita come neve ventata ed ha proprietà meccaniche sostanzialmente diverse rispetto alle proprietà meccaniche della neve fresca.

Questa neve risulta avere un comportamento molto più fragile, rispetto alla neve fresca, ed è inoltre caratterizzata da una coesione elevata dovuta alla compattazione provocata dall'azione del vento stesso che provoca la formazione di lastroni di ghiaccio.

1.6 Le valanghe

Una valanga può essere definita come “un colamento gravitativo rapido di una massa di neve su di un pendio di montagna”.

Tale fenomeno è causato dalla rottura della condizione di equilibrio presente all'interno del manto nevoso a causa di uno stress interno che può portare al raggiungimento del carico di rottura.

Il movimento è governato dalla forza di gravità, da cui il termine gravitativo all'interno della definizione riportata in precedenza, la quale rappresenta la vera forza motrice di tutta l'evoluzione del fenomeno.

Durante la discesa la valanga accumula man mano altra massa nevosa la quale fa sì che vi sia un aumento, anche notevole, della massa totale della valanga rispetto a quella di partenza.



Il fenomeno è caratterizzato da una evoluzione rapida, la valanga si esaurisce in pochi istanti di tempo, con velocità che possono raggiungere i $300 \frac{km}{h}$.

I diversi fenomeni valanghivi, possono essere classificati a partire dalle seguenti caratteristiche:

- Tipo di distacco
- Posizione della superficie di scivolamento
- Umidità della neve
- Caratteristiche del terreno in base al profilo

Per comprendere al meglio le dinamiche e le caratteristiche delle differenti tipologie di valnghe, è necessario definire e conoscere l'area in cui lo scorrimento della massa nevosa si verifica.

Il fenomeno può interessare l'intero versante o soltanto una parte di esso e, in ogni caso, l'area interessata dallo scorrimento può essere suddivisa in 3 diverse zone:

- Area di distacco
- Zona di scorrimento
- Zona di accumulo

1.6.1 Area di distacco

L'area di distacco è quella parte del pendio in cui ha luogo l'innescò del fenomeno da cui si evolve l'evento valanghivo.

In genere tale zona è individuabile nella parte più alta del pendio al di sopra della vegetazione forestale, ovvero in quei luoghi in cui si verifica un maggiore accumulo di massa nevosa a causa delle precipitazioni o di fenomeni di trasporto come per esempio, il trasporto eolico.

A seconda delle caratteristiche del fenomeno valanghivo, a volte, è possibile individuare il limite superiore dell'area di distacco definito come fronte di distacco, questa netta individuabilità del fronte è tipica di valanghe a lastroni. Diverso il discorso nel caso in cui la valanghe interessasse neve a debole coesione, in cui più che un fronte di distacco, lo scorrimento della valanga identifica un punto di partenza.



Per quanto riguarda il limite inferiore dell'area di distacco, a differenza del limite superiore, spesso non risulta essere agevolmente identificabile poiché non presenta una linea o un punto di netta demarcazione rispetto alla precedente.

1.6.2 Zona di scorrimento

La zona di scorrimento è quella parte del pendio interessata dal movimento gravitativo verso valle della valanga stessa.

Spesso è caratterizzata da pendenze meno elevate rispetto alle pendenze caratteristiche dell'area di distacco, in quanto nel momento in cui la massa nevosa si mette in movimento verso valle, l'angolo di attrito dinamico risulta essere inferiore rispetto all'angolo di attrito statico all'incipiente di movimento.

All'interno della zona di scorrimento la massa nevosa raggiunge la massima velocità di scorrimento, ed il massimo della forza, per questo motivo tale zona risulta essere priva di vegetazione forestale (alberi più alti), ma presenta vegetazione più bassa come piccoli arbusti.

La zona di scorrimento può assumere diverse conformazioni a seconda della morfologia del pendio, che possono essere ricondotte a due diverse tipologie ovvero:

- Canalon di scorrimento, i quali risultano essere ben delimitate all'esterno del profilo della valanga, e caratterizzate da pendenze più elevate, in cui si definisce la valanga come “incanalata”.
- Versante aperto, in cui la valanga viene definita come “valanga di versante”.

Spesso la zona di scorrimento può essere costituita dalla combinazione delle due conformazioni sopra enunciate, come per esempio in quei versanti in cui si verifica prima un incanalamento della valanga ed una successiva espansione, dovuta allo scorrimento all'interno di una sezione più larga del versante.

1.6.3 Zona di accumulo

In genere le zone di accumulo possono essere identificate all'interno di quelle aree del versante che presentano ampi ripiani, come per esempio il fondovalle o la zona meno acclive

del versante stesso, oppure possono essere zone in cui lo scorrimento della valanga risulta essere ostacolato, come per esempio, dalla presenza di un versante opposto della vallata.

La zona di accumulo, perciò, è quella porzione del pendio all'interno della quale la valanga rallenta progressivamente fino ad arrestarsi, causando l'accumulo della neve. La neve inizia ad accumularsi nel momento in cui l'angolo di attrito dinamico viene eguagliato dall'angolo di inclinazione del terreno.

Generalmente le zone favorevoli all'accumulo della neve, e quindi al progressivo arresto della valanga, sono quelle che presentano angoli di inclinazione del pendio inferiore ai 15°.

All'interno della seguente Figura 1.1, è riportata la schematizzazione dell'area valanghiva come descritta nei paragrafi precedenti.

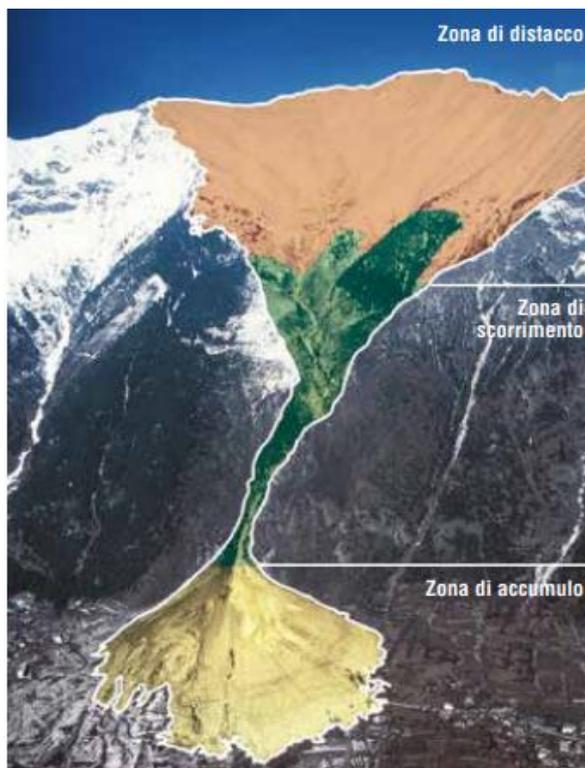


Figura 1.15-schematizzazione dell'area valanghiva
Fonte: “Praolini et al.-2019”

1.6.4 Classificazione delle diverse tipologie di valanghe

Le variabili che entrano in gioco all'interno dei diversi fenomeni valanghivi possono essere molteplici e diverse tra di loro, per questo motivo, per caratterizzare in maniera univoca le valanghe, si rende necessario individuare una classificazione basata su diversi criteri.

Una possibile classificazione delle diverse valanghe, oggettiva ed accettata dai vari esperti operanti in questo campo, è possibile effettuarla prendendo in considerazione le seguenti caratteristiche:

- Tipo di distacco
- Posizione della superficie di scivolamento
- Umidità della neve
- Caratteristiche del terreno in base al profilo
- Tipo di movimento

Il primo criterio va a definire la tipologia di distacco, con questo si vuole far riferimento alla traccia lasciata in posto che la valanga lascia nel punto in cui il distacco è avvenuto. Questa può essere puntiforme, tipica delle valanghe di neve a debole coesione, oppure è possibile individuare una precisa linea di frattura, caratteristica tipica delle valanghe a lastroni.

Per questo motivo una prima distinzione preliminare, tra le diverse tipologie di valanga, può essere rappresentata dalle seguenti due macro-famiglie:

- Valanghe a debole coesione
- Valanghe a lastroni

Le **valanghe a debole coesione** sono tipiche in manti nevosi con neve fresca e poco addensata con metamorfismo ancora agli stati iniziali. In genere sono costituite da neve polverosa, leggera con densità prossime ai $100 \frac{Kg}{m^3}$ e temperature intorno agli $0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Si verificano a causa della prevalenza della forza peso rispetto alla forza resistente per attrito e sono caratterizzati da inneschi puntuali e dal classico profilo a “V rovesciata”.



Figura 1.16-valanga a debole coesione Fonte: “Slf.ch”

Le **valanghe a lastroni** possono essere invece identificate come lo scorrimento di veri e propri blocchi di neve che, a causa della rottura per taglio dei diversi strati che la compongono possono generare scorrimenti su strati più deboli oppure sul suolo stesso.



Figura 1.17- valanga a lastroni
Fonte: “Sif.ch”

Da quest’ultima considerazione, è immediato osservare come entri in gioco il secondo fattore discriminante per la classificazione delle valanghe, ovvero la posizione della superficie di scivolamento. E’ quindi possibile suddividere ulteriormente questa tipologia di valanga, sulla base di quest’ultima caratteristica, in:

- **valanghe di superficie**, nel primo caso
- **valanghe di fondo**, nel secondo caso.

In base al tenore di umidità della neve, terza caratteristica sopra elencata, è possibile individuare:

- **Valanghe di neve asciutta**
- **Valanghe di neve umida**

Un’altra distinzione può essere effettuata considerando le caratteristiche del terreno in base al profilo, da cui è possibile differenziare le **valanghe “incanalate”** da quelle **“di versante”**.

Considerando la differente tipologia di moto con cui la valanga scorre verso valle, è possibile fare un’ulteriore distinzione tra le valanghe definite come **“radenti”**, in cui la massa nevosa scorre a contatto con il suolo e le valanghe definite come **“polverose”**, ovvero quel fenomeno valanghivo per il quale la massa nevosa, scorre verso valle sottoforma di nuvola polverosa.



Le valanghe radenti, sono definite anche come valanghe dense, sono caratterizzate dallo scorrimento della massa nevosa a contatto con il terreno e, per questo motivo, la loro discesa verso valle è fortemente influenzata dalle caratteristiche topografiche del pendio. Le valanghe radenti scorrono verso valle con velocità dell'ordine di alcuni metri al secondo e tale velocità risulta essere influenzata principalmente dalle caratteristiche fisiche della massa nevosa mobilitata. Il distacco, in genere, si verifica in presenza di lastroni a seguito della formazione e della propagazione di fratture all'interno di essi. Sono caratterizzate da uno strato più denso in corrispondenza del suolo, e da strati con densità progressivamente inferiori verso la superficie; ciò è dovuto al continuo rimescolamento della neve a causa degli urti contro le asperità del terreno stesso e del movimento verso valle. Come espresso in precedenza, la velocità che la massa nevosa può assumere, varia in funzione delle caratteristiche del manto nevoso. In genere, nel caso in cui si fosse in presenza di neve umida, condizione tipicamente primaverile, con densità che dell'ordine dei $400 \frac{Kg}{m^3}$, la velocità non risulta essere particolarmente elevata (qualche metro al secondo). Nel caso in cui la neve risultasse più secca, potrebbero essere raggiunte velocità dell'ordine delle decine di metri al secondo, in genere con neve meno densa si forma attorno allo strato più denso, a contatto con il terreno, una nube con altro contenuto di aria.

Le valanghe polverose, vengono definite anche come valanghe nubiformi poiché, durante la loro discesa verso valle, si presentano sottoforma di grosse nuvole polverose che possono raggiungere elevate velocità, dell'ordine delle centinaia di $\frac{Km}{h}$, con picchi che possono arrivare fino ai $300 \frac{Km}{h}$, e, per questo motivo sono caratterizzate da un potere distruttivo molto più elevato rispetto alle precedenti, nonostante la loro densità sia di circa 1/10 di quelle radenti. La densità della nuvola polverosa è notevolmente inferiore rispetto alle valanghe dense, poiché risulta essere composta solo in minima parte da neve, con un'elevata percentuale, della loro composizione, di aria. A causa della loro conformazione lo scorrimento verso valle non è, come nel caso delle valanghe dense, fortemente influenzato dalla topografia del versante; difatti avendo le caratteristiche di un aerosol tendono a scorrere lungo la direzione di massima pendenza del pendio, superando qualsiasi asperità morfologica incontrata lungo tutto il percorso. Le valanghe polverose, sono caratterizzate da zone di arresto molto ampie ed estese, in genere si può osservare come, a causa del grande contenuto energetico che le contraddistingue, non si arrestino subito a valle ma tendono anche a risalire lungo il versante opposto prima di esaurirsi completamente. A causa della



elevata velocità di scorrimento la valanga è preceduta, lungo la sua traiettoria, da un'onda di pressione che genera un rumore che gli alpinisti e gli sciatori, o comunque chi ha assistito al fenomeno, definiscono come un “soffio”, ciò può causare effetti devastanti su qualsiasi cosa che si pone come ostacolo al suo percorso. Le valanghe polverose inoltre, risultano essere caratteristiche di quei manti nevosi che presentano neve fresca o trasportata dal vento, quindi una neve leggera, secca e con bassa coesione interna. Le condizioni ideali per far sì che il manto nevoso risulti essere sotto tali condizioni si hanno nel momento in cui la neve è fresca, quindi depositata da pochi giorni, e le temperature risultino essere più basse.

Nella stragrande maggioranza dei casi però, ciò che si verifica, durante l'evoluzione del fenomeno valanghivo, non è una valanga che presenta strettamente le caratteristiche di una o dell'altra tipologia, ma risulta essere il risultato di una combinazione tra di esse. In questo caso si parla di valanga mista.

E' importante valutare le condizioni del manto nevoso in modo tale da poter conoscere la tipologia di valanga che potrebbe scaturirne. Esistono diverse teorie sulla base delle quali è possibile capire quando vi sia la possibilità evolutiva del fenomeno da valanga radente a valanga polverosa.

In genere le condizioni necessarie affinché si verifichi, a seguito del distacco, la formazione dell'aerosol possono essere ricondotte alle seguenti:

- Distacco di neve con densità inferiore ai $150 \frac{Kg}{m^3}$, con caratteristiche granulari e farinose e di elevato volume.
- Velocità di partenza, subito dopo il distacco, superiore ai $20 \frac{m}{s}$
- Acclività del pendio superiore al 60%
- Convessità della morfologia del percorso in modo tale che, il fronte della valanga, non risulti essere compresso al versante, e vi sia la possibilità di assorbimento dell'aria alla base del fronte stesso con conseguente diminuzione ulteriore della densità della neve e conseguentemente anche dell'attrito di fondo.

Considerando le caratteristiche elencate in precedenza per ciascuna tipologia di valanga, una schematizzazione delle diverse tipologie di valanga è accuratamente riportata all'interno di Figura 1.18.

TIPO DI DISTACCO	POSIZIONE DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO	UMIDITA' DELLA NEVE	CARATTERISTICHE DEL TERRENO IN BASE AL PROFILO	TIPO DI MOVIMENTO
Da un singolo punto  VALANGA DI NEVE INCOERENTE	Dell'intero manto nevoso  VALANGA DI FONDO	VALANGHE DI NEVE ASCIUTTA	Pendio aperto  VALANGA NON DELIMITATA	Nell'aria  VALANGA NUBIFORME
Da un'area estesa  VALANGA A LASTRONI	Dei soli strati superiori  VALANGA DI SUPERFICIE		VALANGHE DI NEVE BAGNATA	canale  VALANGA INCANALATA

Figura 1.18-Schematizzazione delle tipologie di valanga
 Fonte: “Chiaravalloti L. E- 2006”

Infine considerando la causa innescante la valanga è possibile distinguere le **valanghe spontanee**, e quindi occorse a causa di eventi naturali che ne abbiano causato il distacco, dalle **valanghe provocate** artificialmente come per esempio quelle distaccate preventivamente per mettere in sicurezza il pendio ed i territori a valle. Nel capitolo successivo verranno descritte alcune delle tecniche più utilizzate per il distacco artificiale di valanghe.



Capitolo 2. Tecniche per il distacco artificiale di valanghe

2.1 Premessa

Come ben noto ed espresso in precedenza, lo svolgimento di attività antropiche in zone montane comporta una serie di rischi correlati a diversi fenomeni naturali, tra i quali le valanghe responsabili ogni anno di ingenti danni economici ad attività e strutture e, soprattutto, di perdite di vite umane.

Allo stato attuale attraverso modelli matematici e grazie alle strumentazioni di nuova generazione è possibile fare previsioni relative all'estensione spaziale, quindi alla perimetrazione delle zone di distacco, di scorrimento e di arresto che la valanga potrebbe assumere nel momento in cui avviene il distacco.

Tale precisione, però, non è riscontrabile nel momento in cui si volesse fare una previsione relativa al momento preciso in cui il fenomeno valanghivo possa innescarsi, le conoscenze in materia, infatti, permettono di poter individuare delle condizioni meteorologiche e di accumulo della neve favorevoli al distacco, definendo quindi un periodo temporale in cui si abbia maggiore probabilità di accadimento.

In tali situazioni si ha la certezza dell'area esposta al rischio, ma vi è incertezza del momento in cui possa verificarsi l'evento. In questi casi è necessario agire attraverso misure di sicurezza come per esempio, la chiusura degli impianti sciistici e l'evacuazione delle aree a rischio prima che la situazione diventi critica.

Tali misure però, comportano, ovviamente ingenti perdite economiche agli impianti ed all'economia delle aree esposte al rischio, ma, alcune volte risultano essere necessarie, soprattutto in quei casi in cui, il costo dell'installazione di opere di difesa attiva o passiva strutturali, risultasse essere dello stesso ordine di grandezza della stima della perdita economica causata da una chiusura o da una evacuazione.

Per questo motivo la tecnica del distacco artificiale, quando previsto e regolamentato all'interno dei PIDAV, per mezzo di esplosivi o di sistemi che utilizzano miscele di gas, rappresenta una valida soluzione al problema, permettendo, di conseguenza, la messa in sicurezza temporanea, dell'area a rischio e nel contempo la riduzione dei costi di intervento.



2.2 Vantaggi, svantaggi e rischi correlati

Come in tutte le applicazioni di tecniche di messa in sicurezza, anche l'utilizzo dell'esplosivo, o di tecnologie che sfruttano le miscele di gas, per ottenere il distacco preventivo di valanghe, deve essere sottoposto all'analisi dei vantaggi e degli svantaggi con i relativi rischi ad essi correlati.

Lo scopo dell'utilizzo dell'esplosivo è ovviamente quello di ottenere il distacco preventivo delle masse nevose instabili, che possano arrecare danni ai territori a valle di essi, mettendo quindi in pericolo la sicurezza dell'area interessata.

L'abbattimento preventivo delle masse nevose instabili comporta una serie di vantaggi, tra i quali si possono annoverare:

- La messa in sicurezza del territorio a valle con la conseguente eliminazione del rischio latente, in virtù della possibilità di scegliere il momento di distacco più opportuno, provvedendo ad assumere le più corrette misure di sicurezza nel momento in cui si effettua la volata.
- Correlata al precedente vantaggio, le misure di sicurezza e di chiusura degli impianti e, di conseguenza, le perdite economiche, possono essere contenute ed adottate per più breve tempo (quello necessario per ottenere la messa in sicurezza del versante innevato).
- La corretta progettazione del tiro permette di poter ottenere un distacco di una massa nevosa di dimensioni inferiori rispetto a quella che si distaccherebbe nel caso in cui l'innesco avvenisse per cause naturali.
- I costi per la realizzazione del distacco preventivo, risultano essere di gran lunga inferiore rispetto ai costi relativi alla progettazione ed all'installazione delle opere di difesa attiva e passiva.

Di contro però alcuni svantaggi possono essere rappresentati da:

- Necessità da parte del personale addetto alle operazioni di tiro di avere una meticolosa conoscenza sia del materiale esplosivo maneggiato e sia dell'ambiente in cui le operazioni devono essere svolte.



- L'utilizzo dell'esplosivo è necessariamente sottoposto a procedure burocratiche meticolose e necessita di un'organizzazione dettagliata e scrupolosa del progetto, a causa dei rischi connessi al maneggio delle sostanze stesse.
- Difficoltà, in alcuni casi, di poter accedere in maniera agevole ed in totale sicurezza ai punti di tiro.
- Difficoltà di rifornimento dell'esplosivo in periodi di festività e nel weekend
- Impiego dell'esplosivo in situazioni critiche che possono essere rappresentate dalle basse temperature, eventuali precipitazioni (nevose o piovose) in corso, quota di tiro ecc.

Nel momento in cui si intende bonificare un versante innevato, attraverso l'utilizzo degli esplosivi, è necessario valutare quali siano i rischi connessi al loro utilizzo, in modo da poter avere ben chiaro la situazione di pericolo in cui possono incorrere gli operatori ed in particolare i pericoli ed i rischi residui che possono scaturire da un eventuale fallimento del progetto.

Bisogna difatti, tener conto che il distacco potrebbe interessare superfici superiori rispetto a quelle previste in fase progettuale, ciò potrebbe comportare danni in aree in cui non si erano adottate le misure di sicurezza necessarie o nell'area stessa in cui operano gli addetti ai lavori.

Di conseguenza risulta essere necessaria un'attenta e scrupolosa scelta del posto di tiro per la sicurezza degli operatori, ed il limite massimo di neve fresca oltre il quale il tiro non deve essere effettuato per la sicurezza delle aree limitrofe.

Ovviamente l'area interessata dal distacco artificiale deve essere messa in sicurezza, attraverso la preventiva evacuazione della zona, per cui è necessario avere la certezza che all'interno della zona di distacco, scorrimento ed accumulo preventivamente perimetrata, non vi sia presenza umana, controllando in maniera scrupolosa gli accessi alle zone interessate.

Un altro fattore di rischio può essere rappresentato da un distacco “ritardato”, ciò può avvenire nel momento in cui il tiro effettuato non scaturisce effetti immediati, per cui risulta essere necessario stabilire con particolare cautela i tempi di attesa e le misure di interdizione all'accesso nell'area.



2.2 Distacco manuale

Una prima tecnica per il distacco artificiale delle valanghe, può essere rappresentato dal posizionamento manuale delle cariche esplosive.

La tecnica del posizionamento manuale fu molto utilizzata nel periodo pioneristico del distacco artificiale di valanghe tramite esplosivo, ovviamente per tale tecnica esistono molteplici controindicazioni e difficoltà nel realizzarla ma, nonostante i progressi tecnologici e lo sviluppo di tecniche più efficaci e sicure non è ancora caduto totalmente in disuso.

Posizionare manualmente una carica esplosiva sopra il manto nevoso da bonificare, risulta essere assai complesso e non privo di rischi. Infatti la difficoltà principale che si riscontra nell'utilizzo di tale metodo, è rappresentata dal dove necessariamente, raggiungere un luogo raggiungibile rapidamente e sicuro, ma che sia, nel contempo, il più vicino possibile al punto di tiro.

Il metodo del distacco manuale, può essere eseguito attraverso due diverse tecniche di lancio della carica:

- Lancio a mano
- Messa in opera per scivolata

Con la tecnica del lancio a mano, la carica viene lanciata verso il punto di tiro con tutte le difficoltà che ne derivano.

Viste le difficoltà nel lanciare a mano una carica, che difficilmente raggiungerà una distanza superiore ai 20 metri, è necessario raggiungere un punto di lancio che sia il più vicino possibile a quello di tiro; ovviamente esistono ben pochi punti che possano essere raggiunti in completa sicurezza, da parte degli operatori, con tali caratteristiche.

Un altro problema è rappresentato dall'impossibilità del recupero della carica, qualora questa rimanga inesplosa, per questo motivo la carica deve essere obbligatoriamente vincolata ad una fune, in modo tale da poter recuperare la cartuccia nel caso in cui il tiro fallisse. Un altro svantaggio di questa tipologia di tecnica è rappresentata dal fatto che la carica, venendo lanciata dall'alto verso il basso, una volta raggiunto il punto di tiro tende ad affondare nella



neve per effetto della propria caduta, riducendo così il raggio efficace dell'esplosione (argomento che verrà trattato in seguito).

Per quanto riguarda la messa in opera per scivolata, pur rimanendo tutte le difficoltà dovute alla necessità di dover raggiungere un punto di lancio quanto più vicino possibile alla zona efficace, con questo espediente si ovvia il problema dell'affondamento della carica nella neve facendola scivolare, all'interno di sacchi di plastica o di cartone paraffinato, sopra il manto nevoso. Lo scivolamento della carica all'interno di questi sacchi, non avviene con grosse difficoltà nel momento in cui si è in presenza di lastroni di neve, o di neve compatta e secca, ma risulta essere particolarmente problematico nel momento in cui si volesse utilizzare tale tecnica su neve fresca, specialmente se umida.

2.3 Artiglierie

L'uso di artiglierie convenzionali non è consentito in Italia, ma alcuni paesi come Canada, USA e Svizzera utilizzano questi sistemi, cannoni senza rinculo o mortai, per il distacco artificiale di valanghe, nonostante il loro utilizzo non porti risultati eccezionali.

I problemi che si riscontrano nell'utilizzo delle artiglierie possono essere ricondotti ad una insufficiente carica contenuta all'interno del proiettile di mortaio, e soprattutto per i sistemi che utilizzano i cannoni, il proiettile esplose in profondità nel manto nevoso, e ciò comporta una riduzione sostanziale dell'efficienza di propagazione dell'onda d'urto. Dal punto di vista ambientale, inoltre, lo sparo di proiettili di mortaio o da cannone, fa sì che ci sia una certa dispersione di materiale metallico nell'ambiente circostante, infine, nel caso di eventuali colpi inesplosi è molto spesso impossibile procedere con l'eventuale loro recupero.

Tra le diverse tipologie di artiglierie utilizzate, distinguiamo l'Avalancheur, i lanciarazzi ed il sistema WLS. I sistemi appena enunciati verranno di seguito descritti in maniera sintetica.

2.3.1 Avalancheur

Il sistema Avalancheur è il nome commerciale di questo particolare cannone pneumatico utilizzato per il distacco artificiale di valanghe. Il proiettile è lungo 1,8 metri di 40 mm di diametro, con l'utilizzo di questo cannone è possibile raggiungere punti di tiro collocati fino a 2km di distanza e per dislivelli al massimo di 700 metri, ciò è possibile grazie al sistema di propulsione del proiettile che sfrutta l'espansione di una determinata quantità di azoto

compresso immessa nella culatta dello stesso, da regolare in funzione della traiettoria e della gittata voluta.

Il sistema è realizzato in modo tale da permettere l'esplosione della carica in aria per massimizzare gli effetti; la carica inserita all'interno del proiettile dell'Avalancheur è costituita da 2,2 Kg di Nitrococ 8/48, esplosivo liquido a due componenti, singolarmente inerti, che risulta essere degradabile nel giro di alcune ore per cui, a differenza delle artiglierie classiche, con questo sistema si riesce ad ovviare al problema delle eventuali cariche inesplose. Questo sistema ha trovato largo impiego nei territori montani francesi e svizzeri, ma in Italia non è consentito per via delle restrittive legislazioni sull'abbandono delle cariche eventualmente inesplose.



Figura 2.1-Avalncheur posizionato su piattaforma girevole
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

2.3.2 Lanciarazzi

Come nel caso precedente, anche l'utilizzo dei lanciarazzi per il distacco artificiale di valanghe, in Italia non è consentito.

Nei paesi in cui questa tipologia di tecnica è stata utilizzata si è visto come la percentuale di tiri riusciti, per i quali si è ottenuto il distacco della valanga non supera il 50% a causa anche di una buona percentuale di casi in cui il colpo è risultato inesplosivo (FONTE: Renato Cresta “L'esplosivo e la Neve” 2000).

La problematica per la quale i tiri effettuati con questa tipologia di artiglieria fallisce nel 50% dei casi, è da ricondurre al rallentamento che il razzo subisce lungo la sua corsa, soprattutto a causa dell'eccessiva distanza del bersaglio; può capitare infatti che il rallentamento sia tale per cui, la velocità con la quale il razzo raggiunge il bersaglio sia così

bassa da non permettere al percussore di colpire il detonatore con energia sufficiente tale da consentirne l'esplosione.



Figura 2.2-Caricamento di un lanciarazzi
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

2.3.3 Sistema WLS (Wyssen Lawinene Sprengmast)

Definito anche Wyssen tower è un sistema fisso costituito da una torre metallica alta circa 8 metri posizionata in una zona di potenziale distacco individuata.

Sulla sommità della torre è posizionato un involucro d'acciaio, all'interno del quale è possibile posizionare fino a 12 cariche da 5 kg di dinamite. Il sistema è comandato via cavo o via radio e, a seguito del comando ricevuto, il sistema innesca il meccanismo di rilascio della carica.

L'esplosione avviene in aria, grazie ad un sistema a fune per la quale la carica viene trattenuta a circa un metro d'altezza da terra, durante la caduta due accenditori a strappo innescano l'accensione di una doppia catena incendiaria e, successivamente, avviene l'esplosione opportunamente controllata da un sismografo.

Grazie al particolare sistema di aggancio e sgancio del contenitore delle cariche, è possibile, una volta esaurite o per altre necessità, intervenire tramite elicottero rimuovendo il container, rifornendolo ed infine riagganciandolo alla torre metallica. Per questo particolare meccanismo di rifornimento, tale operazione avviene direttamente dall'elicottero in completa sicurezza, e senza la necessità di un intervento al suolo.

In Italia, come nei casi precedenti, l'utilizzo di questo sistema per scopi ambientali non è consentito.



Figura 2.3-Carica sospesa su Wyssen tower
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

2.4 Brillamento da mezzo aereo

Tale metodo permette il trasporto della squadra di operatori e dell’esplosivo, necessario al distacco nella zona di intervento tramite elicottero, le cariche trasportate possono essere in genere fino a 8 Kg.

In Italia le norme sul trasporto delle sostanze pericolose sono particolarmente restrittive, in quanto non è possibile trasportare contemporaneamente sullo stesso mezzo esplosivi e detonatori insieme ed, a maggior ragione, esplosivi già innescati. Tenendo in considerazione anche le norme di pubblica sicurezza e le norme di sicurezza del lavoro, per le quali viene vietato l’impiego di cariche di esplosivo qualora queste non possano essere raggiunte dall’operatore in caso di mancata esplosione, ne consegue che, anche il lancio con conseguente abbandono di qualsiasi oggetto da mezzo aereo è vietato.

In Italia sono stati ideati due metodi diversi per poter parzialmente aggirare queste restrizioni in materia di trasporto e di lancio di esplosivo da mezzo aereo, trasportando il materiale esplosivo attraverso il gancio baricentrico dell’elicottero stesso.

Il primo sistema ideato ed utilizzato, risale agli anni ’70, prodotto dalla ditta Ripamonti, attraverso il quale le cariche, possono essere posizionate all’interno di un contenitore agganciato all’elicottero. Il rilascio della carica avviene grazie all’utilizzo di comandi collegati alla cabina di pilotaggio.

L’esplosivo (circa 3,5 Kg di TNT), è inserito nella parte superiore di un contenitore cilindrico zavorrato di circa 1,5 m di lunghezza, ed è azionato da una doppia catena incendiaria grazie alla presenza di due detonatori a strappo.

Più recentemente agli inizi degli anni 2000, è stato ideato un secondo sistema di trasporto e brillamento di esplosivo da elicottero, ideato dall'ammiraglio Roberto Vassale.

Con questo sistema i detonatori, la miccia e l'esplosivo possono essere mantenuti disassemblati.

La massa esplosiva può variare tra i 3 ed i 6 Kg, in funzione del caso specifico, ed è inserita all'interno di un contenitore metallico cilindrico. Le operazioni di posizionamento della carica nel punto di tiro si eseguono tramite un verricello che ha il compito di calare la carica adagiandola sul manto nevoso, per questo motivo con tale sistema, si ha una maggiore accuratezza nel posizionamento della carica stessa in quanto, questa non affonderà nel manto nevoso, come nel caso precedente.

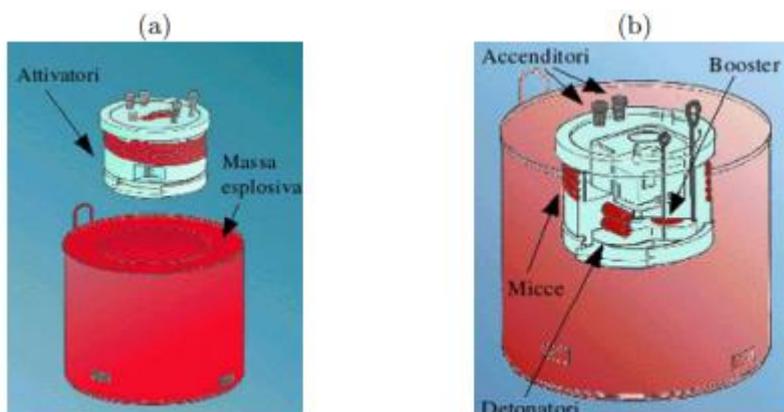
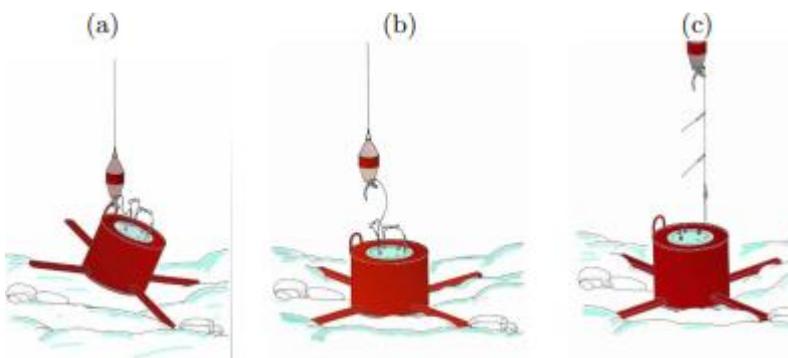


Figura 2.4-Sistema Vassalle schema di dettaglio
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

L'innesco della carica avviene grazie alla presenza di un booster, costituito da 80 gr di tritolo; le operazioni prevedono l'arrivo dell'elicottero sul luogo di interesse ed, infine, il posizionamento della carica sul punto di tiro e l'attivazione del sistema di innesco.



**Figura 2.5-Dettaglio delle operazioni di posizionamento(a),
sgancio(b) e rilascio(c) della carica Vassalle**
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”



2.5 Distacco a distanza (il Ca.T.Ex)

Questa tecnologia per il distacco preventivo di valanghe, prevede l'utilizzo di un sistema più complesso, costituito da cavi metallici adibiti al trasporto di esplosivo.

Il cavo, dal quale vengono calate le cariche, è sorretto da dei piloni posti lungo il pendio, offrendo così il vantaggio di poter raggiungere anche più punti di tiro operando da una postazione distante e sicura.

Il Ca.T.Ex è pensato per provocare sopra i punti di tiro un'esplosione controllata in aria, in modo tale da poter massimizzare gli effetti dell'esplosione stessa sulla neve; ciò ovviamente implica che, per ogni punto di tiro, varierà l'altezza rispetto al suolo alla quale far avvenire l'esplosione; per questo motivo, la geometria del sistema di cavi e piloni è dettata dalla morfologia del pendio stesso.

L'estensione del Ca.T.Ex su tutto il pendio a rischio, rappresenta un importante problema progettuale che deve essere risolto adottando alcuni sistemi che permettano di poter calare la carica a quote idonee per massimizzare gli effetti e garantire l'efficacia del tiro.

Il sistema più semplice per regolare l'altezza rispetto al suolo della carica, si basa sulla sospensione della cartuccia grazie all'utilizzo di una fune, di lunghezza idonea, avvolta su un arganello. L'arganello viene mantenuto fermo grazie alla presenza di un filo di nylon al quale viene fatta aderire la miccia a lenta combustione, che, una volta accesa scioglierà il filo di nylon stesso grazie al calore sprigionato, e lascerà libero di muoversi l'arganello, il quale farà precipitare la carica all'altezza voluta, dettata dalla lunghezza della fune di sostegno, alla quale avverrà l'esplosione.

Questo sistema risulta essere macchinoso e molto laborioso, allungando drasticamente i tempi di durata dell'operazione, ciò è legato alla necessità di dover ogni volta regolare la lunghezza della fune per le diverse altezze di calata per i diversi punti di tiro.

Altri sistemi meno macchinosi e più efficienti da questo punto di vista, si basano sull'utilizzo di un sistema automatizzato grazie all'elettronica.

Per esempio i sistemi che utilizzano una scatola di controllo, all'interno della quale è posizionato un arganello ed un motore elettrico. Questo sistema è regolato da un timer che,

al momento voluto, mette in rotazione l'arganello e consente la discesa della carica fino al raggiungimento della superficie del manto nevoso. A questo punto grazie ad un sensore che identifica il momento in cui la carica raggiunge la superficie, il sistema inverte il movimento dell'arganello che richiamerà verso l'alto la carica, fino al raggiungimento dell'altezza voluta.

Infine, le ultime versioni di questa tipologia di sistemi di distacco artificiale delle valanghe, prevedono l'utilizzo di un sistema radiocomandato grazie al quale è possibile pilotare a distanza, sia la calata che l'accensione della carica stessa.

A fronte dei vantaggi che il sistema offre, dal punto di vista della sicurezza degli operatori e dalla maggiore rapidità di esecuzione delle operazioni grazie ai sistemi radiocomandati; vi sono però da considerare alcuni svantaggi operativi, tra i quali si possono individuare:

- Possibilità di blocco della fune a causa delle rigide temperature che possono formare del ghiaccio che potrebbe impedirne lo scorrimento
- Problemi legati alla gestione dell'esplosivo
- Difficoltà nel raggiungere le stazioni di comando in caso di forte maltempo



**Figura 2.6-Teleferiche Catex posizionate su pendio
soggetto a bonifica
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”**

2.6 Sistemi con miscele gassose esplosive

Questi sistemi rappresentano una valida alternativa alle tecniche più convenzionali basati sull'utilizzo dell'esplosivo e, negli ultimi anni, hanno preso sempre più piede e il numero di installazioni in montagna è cresciuto in maniera esponenziale.



Il principio su cui si basano è l'utilizzo di una miscela di gas, in genere due uno con funzione di combustibile il secondo con funzione di comburente, inseriti all'interno di contenitori di adeguata forma e misura che ne riescano a provocare una esplosione a comando e controllata ad opportuna distanza.

I sistemi che si basano su questo principio sono molteplici, di seguito verranno analizzati quelli più utilizzati.

2.6.1 Gazex®

Il Gazex® è un sistema permanente per la difesa attiva dalle valanghe, il quale principio di funzionamento si basa sull'utilizzo delle miscele di gas esplosive, nello specifico ossigeno e propano; è progettato e realizzato dalla società francese TAS (Technologie Alpine de Sécurité).

La detonazione della miscela di gas avviene all'interno di un “cannone” che funge da esploditore. L'esploditore è ancorato al terreno in punti strategici, all'interno della possibile zona di distacco delle valanghe, ovvero dove la frequenza di accadimento di distacco di masse nevose risulta essere maggiore comportando danni nei territori a valle qualora accadessero, come, per esempio, versanti in prossimità di strade o piste da sci.

Questa tecnologia è operativa dalla fine degli anni '80 ed ha visto una rapida diffusione grazie alla minore rigidità delle prescrizioni circa l'utilizzo delle miscele di gas esplosive rispetto agli esplosivi e, soprattutto, per la maggiore sicurezza degli operatori.

I vantaggi riguardo l'installazione di un sistema Gasex, risultano essere molteplici, tra cui si possono annoverare i seguenti:

- L'avvicinamento ai cannoni ed al deposito dei gas è necessario solo per il rifornimento, in genere una sola volta in quanto il sistema è dimensionato sulla base dei numeri di tiri previsti nell'arco della stagione, o per la manutenzione degli stessi.
- L'efficacia della detonazione è almeno pari a quella che si ottiene tramite l'esplosione in aria di una carica di potenza uguale a quella del volume di gas installato

- In caso di fallimento del tiro non vi è alcun problema di recupero della carica, inoltre i gas si disperderanno in breve tempo in atmosfera, consentendo di effettuare un ulteriore tiro.
- Le operazioni avvengono all'interno di una centrale di controllo, posta anche molto lontana dal punto di tiro, in totale sicurezza per gli operatori.

Di contro però, alcuni svantaggi legati all'installazione di questa tipologia di sistema per la difesa attiva dalle valanghe, possono essere individuati tra i seguenti:

- L'installazione di un sistema Gazex comporta un non indifferente impatto ambientale visivo, in quanto l'architettura del sistema è completamente in antitesi con i paesaggi naturali in cui viene installato
- Rigidità del sistema in quanto, la potenza del cannone è strettamente vincolata dal volume di gas installato, per il quale l'esplosore è stato progettato
- Possibilità di indirizzare l'onda di pressione, derivante dalla detonazione, in unica direzione dettata dalla posizione della bocca del cannone. Ciò implica la necessità, nel caso il sistema risultasse essere poco potente o male direzionato, di dover smontare completamente il sistema e provvedere con la sostituzione. Particolare attenzione deve essere posta in fase di progetto e di scelta del volume di progetto.

Il sistema Gazex, con tutte le componenti principali che ne consentono il funzionamento, può essere schematizzato come all'interno della seguente **Figura 2.7**:

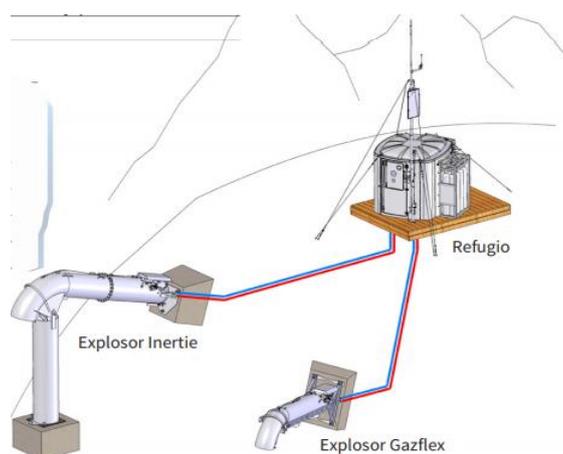


Figura 2.7-Schema sistema Gazex
Fonte: “tas.fr”

Dalla figura precedente è possibile identificare:

- Una capannina di deposito delle bombole di ossigeno e propano, in genere posizionata a monte dell'esplosore, su crinali o comunque in zone idonee per garantirne la sicurezza
- Due tubazioni separate, una per ciascun gas, partono da due diversi serbatoi polmone ed erogano i gas all'esplosore.
- Il cannone, ovvero l'esplosore, posto sul pendio da bonificare, in cui avviene la miscelazione del gas e la conseguente detonazione a seguito di un opportuno innesco.

Inoltre come si evince sempre dalla figura precedente, esistono due diverse tipologie di esplosore, le quali rappresentano le evoluzioni più recenti del sistema:

- L'esplosore Gazex Inerte, ancorato alla base, poggia su un contrappeso scorrevole che assorbe le sollecitazioni derivanti dall'esplosione. Grazie al sistema di ancoraggio alla base ed all'ulteriore sostegno fornito dal contrappeso, questa soluzione è utilizzata nel momento in cui il terreno su cui dovrà essere posizionato, risultasse essere di scarsa capacità portante.



Figura 2.7-Esplosore Gazex inerte
Fonte: “tas.fr”

- L'esplosore GasFlex è vincolato al terreno tramite un sistema a molla, il quale dissipa gli sforzi derivanti dall'esplosione assorbendoli, prima che essi raggiungano gli ancoraggi al terreno. Questo sistema permette di risparmiare sulla cementazione del suolo in terreni di buona qualità.



Figura 2.8-Esploditore GazFlex
Fonte: “tas.fr”

Il sistema è comandato a distanza, via cavo o via radio, da una centrale di controllo; a seguito del comando ricevuto il sistema apre le elettrovalvole poste a monte delle tubazioni, consentendo ai gas di giungere, tramite le due tubazioni, all’esplosore.

La prima tipologia di esplosore inserita sul mercato, il Gazex Standard, ancora oggi utilizzato, risulta essere più massiccio delle altre due configurazioni. Il sistema è ancorato al terreno tramite un blocco di cemento, mentre, per garantirne una maggiore stabilità, è sostenuto da 2 o da 4 aste metalliche vincolate al suolo.



Figura 2.9-Dettaglio barre metalliche di ancoraggio del Gazex
Fonte: “tas.fr”

L’esplosore è dotato di uno specifico sensore, il quale, a seguito della variazione di pressione, dovuta all’arrivo dei due gas, accende un circuito elettrico che ha il compito di caricare un condensatore. Infine il condensatore scarica l’energia accumulata, con un



opportuno ritardo dettato da un timer, su di un doppio innesco ad arco dal quale scocca la scintilla che ne provocherà la detonazione.

Una ulteriore distinzione tra i diversi sistemi è possibile effettuarla sulla base del volume di gas per cui il sistema è stato dimensionato, attualmente i volumi commerciali del Gazex®, sono: $0,8 m^3$, $1,5 m^3$ e $3 m^3$ e $4,5 m^3$.

2.6.2 Avalhex

L'AvalHex è un sistema utilizzato nell'ambito del distacco artificiale delle valanghe che, come il Gazex, sfrutta l'esplosione di una miscela di gas utilizzando una differente tecnica.

La miscela di gas è costituita da Idrogeno e ossigeno, che nello specifico fungono rispettivamente da combustibile e da comburente.

Tutto il sistema è articolato nei seguenti comparti:

- Deposito dell'idrogeno compresso all'interno di bombole ad una certa distanza dal punto di esplosione.
- Condotte per l'erogazione del gas al sistema
- Torre metallica, sede dell'esplosione all'interno di particolari palloni posizionati in contenitori sulla periferia del tamburo di testa.
- Comandi di avvio e controllo a distanza, attraverso i quali è possibile azionare il sistema di erogazione dei gas.

Il sistema è caratterizzato dalla presenza del solo combustibile all'interno del deposito, mentre l'ossigeno viene prelevato direttamente dall'atmosfera. Questo sistema, offre un vantaggio dal punto di vista logistico, infatti, l'idrogeno risulta essere facilmente reperibile sul mercato, inoltre lo stoccaggio di tale gas, non rappresenta un grosso problema dal punto di vista della sicurezza, in quanto essendo un gas estremamente leggero (15 volte in più dell'aria), si disperde rapidamente in atmosfera nel caso di fuoriuscite, evitando la formazione di sacche di gas esplodenti.

L'esplosione avviene grazie all'erogazione dell'idrogeno all'interno di una struttura metallica, alta un paio di metri con dimensioni sufficienti per garantirne la resistenza e la

stabilità a causa delle forti sollecitazioni indotte dall'esplosione stessa, oltre che dal movimento delle masse nevose.

La struttura, è costituita da una colonna metallica sormontata da un tamburo sul quale, lungo il perimetro, sono posizionate da 16 a 24 capsule, contenenti dei palloni di lattice di gomma ripiegati all'interno di esse, in modo tale da permetterne il rigonfiamento.

Il rigonfiamento dei palloni avviene nel momento in cui, attraverso i comandi a distanza, viene azionata un'elettrovalvola la quale eroga all'interno del pallone l'idrogeno miscelandolo con l'ossigeno.

L'ingresso dell'ossigeno all'interno del pallone, avviene attraverso la base del contenitore, che avendo la sagoma di un tubo Venturi, aspira l'aria dall'ambiente circostante sfruttando la pressione e la velocità del flusso di idrogeno, in ingresso dallo stesso.

L'esplosione avviene nel momento in cui termina l'immissione del gas all'interno del pallone, attraverso un accenditore elettrico posizionato nel pallone stesso che fornirà la scintilla innescante del sistema.



**Figura 2.10-Sistema Avalhex con pallone prima della
detonazione e durante la detonazione**
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

La principale difficoltà nell'utilizzo dell'Avalhex, è rappresentata dal dover necessariamente mantenere la temperatura all'interno dei contenitori, in cui sono ripiegati i palloni, al di sopra di un certo limite, a causa dell'aumento di fragilità degli stessi alle basse temperature.

Si potrebbe pensare di ovviare tale problema, utilizzando materiali più resistenti, derivati dalla plastica per esempio, che di contro però, una volta dispersi nell'ambiente, non sono facilmente degradabili.



Dal punto di vista tecnico, il sistema è progettato in modo tale da poter eseguire due tipologie di esplosione differenti, in funzione del tempo di erogazione del gas, che nello specifico può essere:

- Detonante
- Deflagrante

Nel primo caso la durata dell'erogazione del gas all'interno del pallone dura 120", consentendo l'accumulo di un volume di gas tale per cui è possibile ottenere una detonazione, con una velocità intorno ai $1900 \frac{m}{s}$.

Nel secondo caso il sistema eroga, per un tempo che si aggira intorno ai 90", circa 1000 litri di idrogeno all'interno del pallone, ottenendo una miscela esplosiva di circa $4 m^3$; la velocità dell'esplosione, in questo caso, si attesta a valori prossimi, ma inferiori alla velocità del suono tipici di una deflagrazione.

L'utilizzo di una tipologia di esplosione rispetto ad un'altra è da scegliere accuratamente, la prima si preferisce nel momento in cui risulta essere necessaria un'esplosione con elevato contenuto energetico a scapito della durata dell'onda d'urto, la seconda viene utilizzata nel momento in cui l'effetto lo si vuole ottenere attraverso sollecitazioni più durature nel tempo, nonostante un'onda di pressione più debole.

Dal punto di vista dell'efficacia, un tiro dell'Avalhex, a seconda della tipologia di esplosione, corrisponde a 3,5 Kg di TNT_{eq} nel caso di esplosione detonate, ed a 3 Kg di TNT_{eq} nel caso di esplosione deflagrante (Fonte: Cresta-“L'esplosivo e la neve” 2000).

2.6.3 Daisybell

Il sistema Daisybell rappresenta una variante elitrasportabile dei sistemi per il distacco artificiale di valanghe. Come nei casi precedenti la destabilizzazione del manto nevoso, viene ottenuta tramite l'esplosione di una miscela di gas (in questo caso idrogeno ed ossigeno) ad una certa altezza dal manto nevoso.

Il sistema Daisybell, è progettato dalla società T.A.S. (Technologie Alpine De Sécurité), ed è costituito da un cono in acciaio, sede della miscelazione e della conseguente esplosione del gas combustibile e del comburente.



Figura 2.11- Campana del sistema Daisybell
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

Osservando il sistema all’interno della fotografia di **Figura 2.11**, è possibile avere un quadro generale delle caratteristiche di questo sistema; sono ben visibili, infatti, i supporti antivibrazioni sui quali sono fissate due bombole per l’idrogeno ed una per l’ossigeno, oltre alla forma conica della struttura di supporto del sistema.

La campana grazie ad un particolare sistema di aggancio è appesa sotto l’elicottero ad una distanza variabile tra i 10 ed i 20 metri, calcolata dalla testa della Daisybell ed i pattini dell’elicottero stesso, a seconda della morfologia del territorio sorvolato e dalle scelte di volo del pilota.

Dal punto di vista del funzionamento, all’interno della camera conica di miscelazione vengono iniettati i due gas dalla sommità del cono stesso. La camera e le iniezioni dei gas sono progettate per ottenere una miscelazione uniforme del combustibile e del comburente, la quale verrà innescata grazie alla presenza di due candele poste alla sommità del cono stesso.



Figura 2.12- Daisybell sospeso in funzione
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

Il controllo della miscelazione e del flusso di gas entrante all'interno della camera di miscelazione, avviene grazie ad un sistema costituito da una doppia camera di espansione collegata ad un foro calibrato, che permettono di poter ridurre la pressione iniziale, ovvero la pressione del gas all'interno delle bombole, di circa 200 *bar* fino a qualche *bar*; in questo modo l'operatore addetto ai tiri è in grado di conoscere con buona precisione il flusso di gas entrante nella camera di miscelazione.

L'operatore addetto all'utilizzo del sistema Daisybell, è in grado di comandarlo dall'interno della cabina dell'elicottero grazie all'utilizzo di un quadro elettrico di controllo trasportabile, la quale è messa in collegamento con il sistema tramite onde radio da un'antenna con base magnetica posizionata sui pattini dell'elicottero.

Un software dedicato ed un piccolo schermo permettono di tener sotto controllo tutti i principali parametri di funzionamento della Daisybell, in modo da poter procedere con l'innesco della miscela nel momento in cui tutti i parametri soddisfino le condizioni ideali di rito.

Tra i parametri principali controllati dall'operatore rientrano, per esempio, il flusso di gas entrante all'interno della camera, la percentuale di autonomia della Daisybell e lo stato della carica delle batterie. Di particolare importanza è la corretta valutazione della distanza Suolo-Fondo della campana, in modo tale da posizionare la Daisybell ad un'altezza del manto nevoso ideale all'ottimizzazione delle prestazioni del tiro, ciò è possibile grazie all'installazione di un sistema di lettura della distanza.

In seguito alle diverse esperienze di utilizzo della Daisybell, si è riscontrato come, l'altezza ideale di scoppio della miscela oscilla tra i 3 ed i 10 m in funzione della morfologia del territorio ed alla tipologia di manto nevoso.

Dal punto di vista tecnico, evidenze empiriche hanno evidenziato come l'esplosione della miscela gassosa, contenuta all'interno della campana, provochi una sovrappressione al suolo, di 80/90 mbar, ad una distanza di 12 metri. I risultati delle campagne sperimentali hanno evidenziato analogie di prestazioni tra la Daysibell ed il Gazex da 0,8 m³.

2.6.4 O'bellx

Il sistema O'bellx, anche esso progettato dalla società T.A.S., sfrutta come nel caso della Daysibell l'esplosione di una miscela di idrogeno ed ossigeno, modificandone però la tecnica di innesco e posizionamento sul punto di tiro. A differenza del sistema Daisybell, l'O'bellx è un sistema fisso costituito da un modulo funzionale conico in acciaio, sede della miscelazione e conseguente esplosione dei gas, sorretto da un palo in acciaio inclinato, vincolato al terreno da barre di ancoraggio.



Figura 2.13- sistema O'bellx
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

Dati tecnici di funzionamento riferiti all'esplosione forniscono una velocità di esplosione di 2200 $\frac{m}{s}$, con una conseguente sovrappressione al suolo in corrispondenza del punto di scoppio di 300 mb.

Il vantaggio del sistema O’bellx è relativo alla sua elevata dinamicità di utilizzo, grazie alla possibilità di comando a distanza, tramite lo stesso software utilizzato per il GazEx, ed alla sua postazione fissa, per la quale, il suo funzionamento, prescinde dalle condizioni meteo e dalle problematiche legate all’accesso nel sito dell’esplosione.

La particolarità di questo sistema, risiede nel modulo funzionale che è mobile ed elitrasportabile, ciò permette quindi di eseguire operazioni di manutenzione e di ricarica delle bombole direttamente in fabbrica. E’ importante sottolineare, come le fasi di aggancio al sistema di supporto, sgancio e trasporto possano essere eseguite direttamente dall’elicottero senza la necessità di supporto umano a terra, aumentando quindi le caratteristiche di sicurezza del dispositivo.

L’autonomia del sistema dipende dal volume delle bombole di gas installate in fase di ricarica che in genere non superano i 60 tiri, che comunque risulta essere un numero abbastanza elevato e spesso sufficiente a coprire le esigenze di bonifica per un lungo periodo di tempo; ciò permette di procedere con le operazioni di recupero e manutenzione durante l’arco estivo senza intervenire durante il periodo invernale, coincidente con il periodo di attività del sistema.



Figura 2.14- Posa del sistema O’bellx tramite elicottero
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

Un vantaggio, che sicuramente contraddistingue i sistemi O’bellx dai più classici GazEx, è rappresentato dall’impatto ambientale, difatti, il design del sistema O’bellx è concepito in modo tale da essere di gran lunga meno impattante sul paesaggio montano rispetto al GazEx.

2.7 APR SNIPER

Alcune delle tecniche enunciate in precedenza, necessitano di personale che possa trasportare sul punto di tiro l'esplosivo o come nel caso della Daisy bell, il sistema con la miscela di gas esplosiva all'interno, ciò comporta dei rischi in alcuni casi anche elevati, per gli operatori addetti all'esecuzione del tiro per la bonifica.

Una tecnica rivoluzionaria da questo punto di vista, che non presuppone più la presenza di un operatore in un luogo limitrofo al punto di tiro o in elicottero, è rappresentata dal Sistema SNIPER per APR (aeromobile a pilotaggio da remoto).

Grazie all'utilizzo del drone, gli operatori incaricati della bonifica del sito, operano all'interno di una piazzola di pilotaggio, lontano dal punto di tiro, in cui possono monitorare l'andamento dell'operazione in totale sicurezza.

L'utilizzo del drone per gli interventi di bonifica dei pendii innevati, risulta essere sicuramente più rapido e versatile, rispetto al trasporto in elicottero, questo quindi permette di poter eseguire più interventi in diversi punti, in un tempo decisamente più ridotto mentre, nei casi visti in precedenza i sistemi erano posizionati in un punto fisso, in zona a potenziale rischio valanghe.



Figura 2.15- APR Sniper
Fonte: “snipertechnology.it”



Figura 2.16- APR Sniper in azione
Fonte: “snipertechnology.it”

La carica di 2300 grammi, è collocata grazie ad un apposito supporto all’interno del drone ed è commercialmente denominata SNP 25. L’esplosivo è composto da polvere pirica che produce un effetto di esplosione deflagrante con basse velocità di reazione, grazie alle quali si garantisce una idonea progressività dell’azione dell’onda d’urto sul manto nevoso.

Nei capitoli finali, l’analisi degli effetti sul manto nevoso di questa tipologia di carica esplosiva è stata effettuata considerando, per i parametri necessari ai fini del calcolo, valori tipici della polvere pirica di seguito riportati.

- Velocità di detonazione: $1100 \frac{m}{s}$
- Massa volumica: $1350 \frac{Kg}{dm^3}$
- Energia specifica: $3,2 \frac{MJ}{Kg}$



Capitolo 3. Esplosione ed effetti sulla neve indotti dall'esplosione

3.1 Premessa

Il meccanismo di rilascio artificiale delle valanghe è un fenomeno alquanto complicato, in cui entrano in gioco diversi fattori tecnici e fisici che possono influenzare, più o meno direttamente, la corretta esecuzione del tiro attraverso il quale si vuole ottenere il distacco del manto nevoso.

Un fattore certamente importante e fondamentale è l'impulsivo sovraccarico di pressione sul manto nevoso dovuto all'esplosione stessa. Oltre a questo, però, sull'effettivo distacco della valanga, giocano un ruolo fondamentale anche la fratturazione degli strati più deboli del manto nevoso, specialmente nei casi in cui la bonifica riguardasse cornici di neve o neve bagnata.

3.2 L'esplosione ed i suoi effetti

Il fenomeno dell'esplosione può essere identificato come una particolare trasformazione chimica o chimico-fisica, istantanea ed esotermica con sviluppo di energia e di gas.

I gas sviluppati dalla reazione esplosiva, tendono ad occupare volumi molto grandi (variando da 10000 a 30000 volte il volume iniziale), raggiungendo temperature superiori ai 3000 °C e pressioni che possono arrivare anche fino alle 15000 atmosfere.

Da una prima particella che viene coinvolta all'interno della reazione esplosiva, vengono coinvolte le particelle adiacenti, le quali reagiscono ed esplodono a loro volta innescando una sorta di reazione a catena.

L'energia viene così liberata completamente, coinvolgendo tutte le particelle che costituiscono la carica esplosiva con una velocità che può variare dalle molte centinaia alle migliaia di metri al secondo.

Nella seguente **Figura 3.1**, è possibile osservare lo sviluppo energetico di una reazione esplosiva.

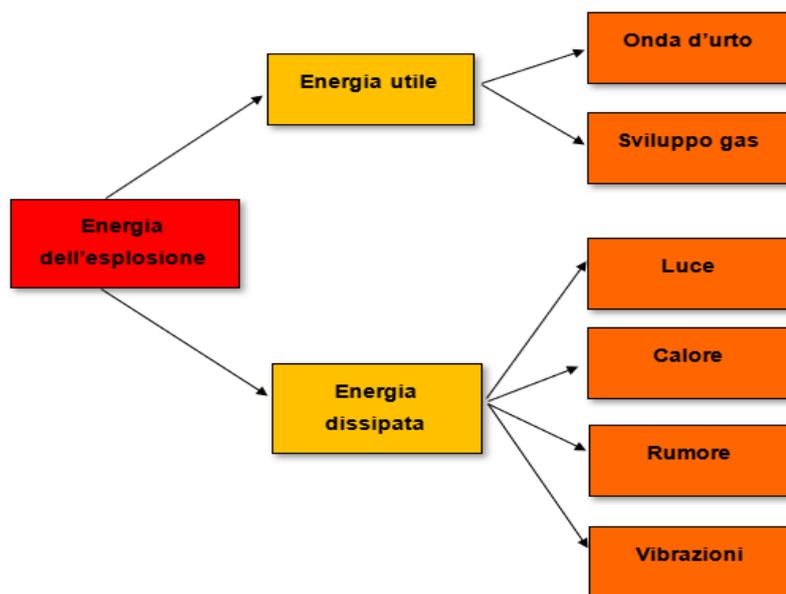


Figura 3.1- Sviluppo energetico a seguito di una esplosione

L'esplosivo è ormai largamente utilizzato nell'ingegneria degli scavi. Nel caso di esplosione in roccia, il materiale viene sgretolato e polverizzato nelle immediate vicinanze della carica, in genere la zona in cui avviene la polverizzazione del materiale si riscontra fino ad una distanza pari al diametro della carica stessa.

Oltre questa distanza, la roccia viene fratturata a causa delle fortissime forze di trazione, fino ad una distanza che può variare da 4 a 6 volte il diametro della carica, in base alla tipologia di roccia interessata.

L'onda d'urto generata dall'esplosione si trasmette, attraversando la roccia, anche a distanze maggiori senza provocare fratture. Infine, in base della densità del mezzo in cui viene fatta brillare la carica, le vibrazioni si trasmettono ad una distanza che risulta essere tanto maggiore, quanto maggiore è la densità della roccia stessa.

In roccia intatta e compatta, con totale assenza di fessurazioni, l'onda d'urto si trasmette fino a raggiungere la periferia del materiale attraversato, da cui per rimbalzo, si crea un'onda retrograda che ritorna al punto in cui è avvenuta l'esplosione.

La combinazione tra l'onda d'urto esplosiva e l'onda retrograda costituisce quello che viene definito come urto esplosivo.

3.2.1 Detonazione e deflagrazione

Gli esplosivi possono essere differenziati dai normali combustibili a causa della presenza, all'interno della loro struttura molecolare, del comburente ovvero dell'ossigeno. La presenza del comburente fa sì che, tali sostanze, sviluppino velocità di reazioni molto elevate, con conseguente rilascio di altissime pressioni e sviluppo di gas.

Una prima differenza peculiare tra le due tipologie di reazioni che possono avvenire durante l'espletamento del fenomeno esplosivo, deflagrazione e detonazione, può essere effettuata considerando le diverse velocità di reazione raggiunte a seconda che si tratti della prima o della seconda tipologia di reazione esplosiva.

Per quanto riguarda il fenomeno della deflagrazione, la velocità di reazione raggiunta si attesta intorno a valori dell'ordine delle centinaia di metri al secondo, invece per la detonazione, la velocità di reazione raggiunge valori dell'ordine delle migliaia di metri al secondo. A dimostrazione di ciò, sono riportate, all'interno di **Figura 3.2**, le distanze coperte in un secondo per diverse tipologie di esplosivo, in comparazione con altri fenomeni fisici veloci.

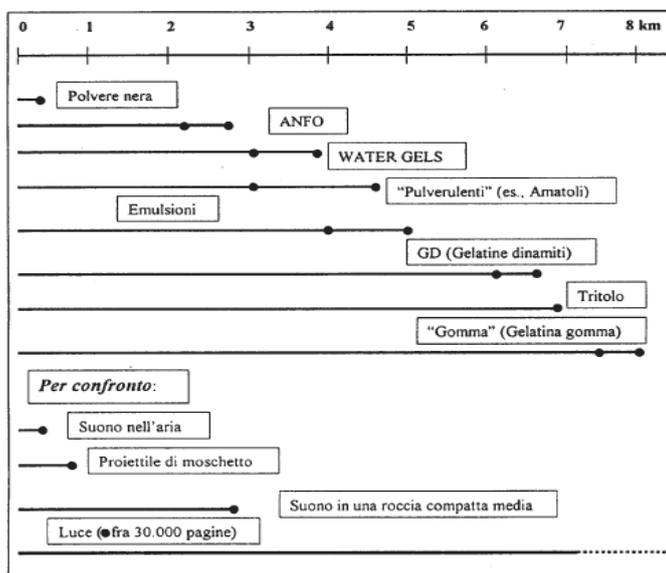


Figura 3.2- Distanze coperte in 1 secondo dai diversi esplosivi in confronto con fenomeni fisici naturali
Fonte: “Mancini, Cardu-2000”

Le differenti velocità di reazione, non sono le uniche proprietà attraverso le quali effettuare una distinzione netta tra i due diversi fenomeni; infatti deflagrazione e detonazione sono due reazioni con caratteristiche fisico-chimiche molto differenti tra di loro.



Una reazione esplosiva deflagrante, può essere descritta come un particolare fenomeno che si propaga progressivamente per tutto lo sviluppo della carica per conduttività termica. La velocità di reazione dipende dalla forma e dalla dimensione dei granuli che compongono la carica stessa. A granuli di dimensioni inferiori infatti, corrispondono velocità di deflagrazione maggiori.

La detonazione è un fenomeno sostanzialmente diverso, in quanto non può essere definito come una semplice reazione di combustione, ma più propriamente si parla di meccanismo dell'onda esplosiva, caratterizzata dalla mutua assistenza ed esistenza, in corrispondenza del fronte d'onda, di un fenomeno fisico, ovvero la propagazione dell'onda d'urto e di pressione e di un fenomeno chimico ovvero della reazione di combustione.

Come già evidenziato in precedenza, lo scoppio di un esplosivo, produce un elevato volume di gas, il quale viene liberato in alcuni millesimi di secondo, a seconda della velocità di reazione raggiunta, ciò fa sì che tale volume di gas risulti essere estremamente compresso raggiungendo perciò temperature e pressioni elevatissime.

In seguito allo scoppio, i gas vengono allontanati rapidamente dal centro dell'esplosione, tale fenomeno avviene a velocità estremamente rapide causando, in quel determinato punto, una importante diminuzione di pressione con conseguente precipitazione istantanea dell'aria per colmare il vuoto creato.

Considerando i due diversi fenomeni possono essere riportati, all'interno di un grafico P vs T , i valori di pressione dell'onda di pressione e dell'onda retrograda ottenendo la caratteristica curva a forma di N (differente per detonazione e per deflagrazione), riportata all'interno di Figura 3.3.

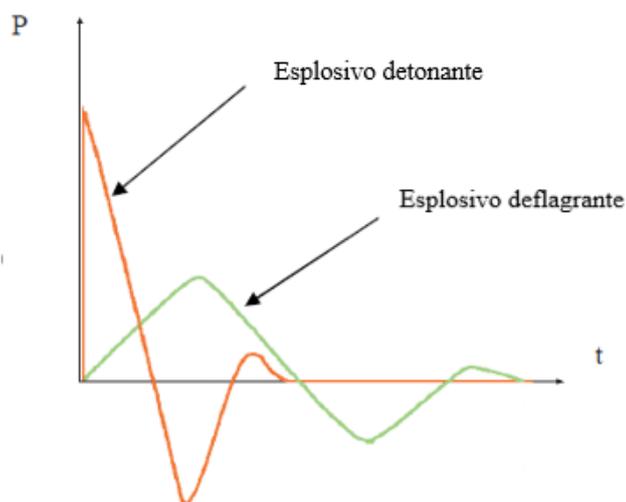


Figura 3.3- Confronto tra detonazione e deflagrazione in grafico PvsT

In genere, per quanto riguarda il loro utilizzo, gli esplosivi deflagranti vengono utilizzati all'interno dell'ingegneria mineraria quando all'effetto di frantumazione e sgretolamento del materiale viene preferito un effetto di spinta con poca frantumazione, specialmente per la coltivazione delle rocce ornamentali.

Gli esplosivi detonanti vengono preferiti quando si vuole ottenere il risultato inverso, quindi la sgretolazione della roccia, risultato tipico dello scavo in galleria.

Considerando il grafico della figura precedente, è immediato notare quale sia, dal punto di vista delle pressioni, la differenza sostanziale tra la deflagrazione e la detonazione considerando il rilascio energetico: l'esplosivo detonante rilascia maggiore energia, quindi sviluppa maggiore pressione, in tempi molto più ristretti rispetto alla deflagrazione.

Ritornando perciò agli argomenti trattati all'interno di questa tesi, e considerando gli scopi di utilizzo dell'esplosivo per l'abbattimento preventivo delle valanghe, ne consegue che, avere a disposizione una maggiore energia utile prolungata maggiormente nel tempo, farebbe preferire gli esplosivi deflagranti agli esplosivi detonanti per il loro migliore accoppiamento con la neve.

In commercio esistono diverse tipologie di esplosivo, con caratteristiche detonanti e deflagranti, che possono ulteriormente differire tra di loro per composizione chimica e struttura fornendo all'esplosione differenti caratteristiche, attraverso le quali è possibile



scegliere la tipologia di esplosivo da utilizzare in funzione dello scopo, in modo da massimizzare l'efficienza per quello specifico utilizzo.

Prima di analizzare e fornire alcuni concetti utili alla scelta dell'esplosivo più idoneo, al suo posizionamento relativo al manto nevoso da bonificare ed al dimensionamento, è utile richiamare le principali tipologie di esplosivo utilizzati in ambito ingegneristico, i quali verranno descritti nel successivo paragrafo.

3.3 Gli esplosivi

Una definizione di “sostanza esplosiva” può essere identificata dalla seguente:

- L'esplosivo è una sostanza allo stato condensato (sia esso solido o liquido), che, a seguito di un idoneo stimolo localizzato, definito come innesco, reagisce esotermicamente, in un tempo brevissimo con prodotti finali in tutto, o in gran parte, gassosi alla temperatura raggiunta nella reazione.

Come evidenziato all'interno del paragrafo precedente, gli esplosivi possono essere suddivisi in funzione della loro velocità di detonazione. Questa distinzione però, non è sufficiente per ottenere un quadro completo sulla diversità di ogni singolo esplosivo, in quanto la loro classificazione non è stabilita solo ed esclusivamente da un unico parametro.

Una ulteriore distinzione preliminare, attraverso la quale è possibile ottenere una macroclassificazione, delle diverse tipologie di esplosivo, può essere eseguita considerando la composizione chimica dell'esplosivo stesso, identificando perciò le tre seguenti macro categorie:

- Composti chimici, ovvero quegli esplosivi composti da un unico tipo di molecole, quindi un'unica sostanza come nel caso del tritolo
- Miscugli esplosivi, in cui rientrano gli esplosivi formati dalla combinazione di due o più componenti, i quali presi singolarmente, nessuno di essi è esplosivo
- Miscele esplosive, ovvero quelle sostanze formate dalla combinazione di due o più sostanze in cui, se prese separatamente, almeno una è esplosiva.

A questo punto, effettuata una rapida distinzione per identificare le diverse tipologie di esplosivo è necessario scendere più nel dettaglio della composizione chimica e delle

caratteristiche degli esplosivi più utilizzati per scopi ingegneristici, in modo da poter ottenere un quadro completo su di essi, prima di fornire alcune considerazioni in merito alla loro più o meno efficiente applicabilità nella bonifica dei pendii innevati.

3.3.1 Polvere nera

La polvere nera è l'esplosivo più antico di cui se ne conosca l'utilizzo, la quale ha trovato largo impiego nei più svariati campi di applicabilità; dalle applicazioni militari, all'utilizzo nell'ingegneria mineraria ed è ancora oggi molto utilizzato per il brillamento dei fuochi pirotecnici.



Figura 3.4- Polvere Nera

La polvere nera è caratterizzata da bassi valori di velocità di reazione, molto inferiori rispetto alla propagazione del suolo in aria, per cui rientra all'interno della categoria degli esplosivi deflagranti a basso contenuto energetico.

Per quanto riguarda la composizione di tale esplosivo, può presentarsi in molteplici forme e con diverse tipologie di materiali opportunamente bilanciate tra di loro, si può però far riferimento ad una composizione media di tale polvere, in quanto essa risulta essere costituita, nella maggior parte dei casi da:

- Nitrato di potassio, con una percentuale di composizione intorno al 75 %
- Carbone vegetale, con una percentuale variabile tra i 15\12,5 %
- Zolfo, con una percentuale intorno al 10\12,5 %

Le percentuali di composizione della polvere nera sono variabili a seconda delle specifiche di utilizzo, in quanto aumentare o diminuire la percentuale di un componente rispetto ad un altro permette di favorire una caratteristica rispetto ad un'altra.

Per esempio aumentando la percentuale del carbone vegetale si aumenta la velocità di reazione a scapito del potere calorifico della polvere, al contrario diminuendola ed aumentando la percentuale di Zolfo si preferisce aumentare le proprietà calorifiche ed energetiche della polvere nera piuttosto che la velocità di reazione che, difatti, diminuisce.

In ambito ingeneristico viene utilizzata all'interno delle micce a lenta combustione, per l'innescio di esplosivi detonatori comuni e per le varate di pietre ornamentali.

E' caratterizzata da un'elevata igroscopicità, per cui è resa inutilizzabile in ambienti umidi e quindi con presenza di acqua se non attraverso specifici accorgimenti, necessita inoltre di particolare attenzione dell'ambiente in cui viene conservata, il quale deve essere asciutto, ventilato e con una temperatura inferiore ai 40 °C.

3.3.2 Esplosivi al Nitrato d'Ammonio (NH_4NO_3)

In questa categoria rientrano quegli esplosivi, pulverulenti, formati da Nitrato d'Ammonio ovvero da un sale ottenuto dalla reazione tra ammoniaca ed acido nitrico, più altre sostanze.



Figura 3.5- Nitrato d'ammonio

Il principale esplosivo al Nitrato Ammonico è l'ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil), un miscuglio esplosivo, prodotto aggiungendo al Nitrato d'ammonio un olio combustibile, come il diesel ed altri additivi minori. Vista la sua composizione, uno dei vantaggi relativo



all'utilizzo dell'ANFO è sicuramente la sicurezza dal punto di vista del trasporto e dello stoccaggio, vista la non esplosività dei due componenti di cui è formato, se presi separatamente.

L'ANFO è definito come esplosivo detonante secondario, dove con il termine secondario si identificano quegli esplosivi detonanti che necessitano dell'ausilio di un detonante primario per esplodere, in quanto i detonanti primari, avendo una maggiore sensibilità, riescono a detonare semplicemente all'urto ed il loro utilizzo garantisce la detonazione dei secondari, meno sensibili.

L'ANFO è un esplosivo molto diffuso ed utilizzato nell'ambito dell'ingegneria mineraria, il suo utilizzo, come già evidenziato in precedenza, risulta essere abbastanza sicuro, dal punto di vista della manipolazione delle sostanze. E' necessario però porre particolare attenzione alla preparazione dell'ANFO stesso, in quanto necessita di un perfetto bilanciamento tra le componenti, in modo da ottenere il rapporto ottimale tra Nitrato d'Ammonio e gasolio per essere certi della detonazione e per migliorarne le caratteristiche di sicurezza.

L'ANFO, in via del tutto generale, è costituito dai due materiali precedentemente enunciati secondo il seguente rapporto:

- 94% di Nitrato di Ammonio
- 6% di gasolio

Una composizione di ANFO che non rispetti le percentuali sopra indicate, oltre a non garantire la detonazione dell'esplosivo, comporta la generazione, a seguito dello scoppio, fumi tossici come il monossido di carbonio (*CO*) ed il monossido d'azoto (*NO*).

A causa delle caratteristiche intrinseche del materiale costituente l'ANFO, è necessario per il suo utilizzo rispettare alcune ben specifiche disposizioni:

- Il diametro minimo della carica non può essere inferiore ai 50 *mm*
- Impossibilità di utilizzo in ambienti con presenza di acqua a causa dell'elevata igroscopicità del materiale, se non con particolari accorgimenti che ne consentano l'utilizzo.
- Impossibilità di utilizzo in ambienti grisutosi ed in cave sotterranee, a causa della possibilità di formazione di fumi tossici



- Ambito climatico di utilizzo tra $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ \ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

In Italia la Pravisani S.P.A. è tra i maggiori produttori di esplosivi, tra cui anche l'ANFO, il quale nome commerciale è ANFO 5 avente le seguenti specifiche tecniche, reperibili all'interno della scheda tecnica messa a disposizione dall'azienda di cui si riporta uno stralcio in Tabella 3.1:

CARATTERISTICHE TECNICHE

		AN-FO 5
Densità	[g/cm ³]	0,80 ± 0,05
Energia	[MJ/kg]	3,8
Velocità detonazione (Ø 50 mm) <i>in aria libera</i>	[m/s]	2700
Volume di gas (T 25°C)	[l/kg]	1054
Distanza di colpo (Ø 50 mm)	[mm]	> 20

Tabella 3.1- Caratteristiche tecniche AN-FO 5
Fonte: “Pravisani s.p.a.”

3.3.3 Esplosivi gelatinati

Tra gli esplosivi industriali ed utilizzati nell'ambito ingegneristico, gli esplosivi gelatinati sono quegli esplosivi detonanti, a base di nitroglicerina (definiti anche dinamiti), costituiti da una miscela a base attiva che prende il nome di gelatina.

La nitroglicerina è una sostanza esplosiva molto potente ma estremamente sensibile ed instabile, grazie ad Alfred Nobel nel 1867, fu ideata la dinamite grazie alla miscelazione della nitroglicerina con la polvere di diatomee che permise di ottenere una sostanza esplosiva più stabile successivamente, in tempi più recenti, la polvere di diatomee venne sostituita da altre sostanze, tra cui gli ossidanti, che permisero di aumentarne l'energia.

Sono esplosivi caratterizzati da elevate velocità di detonazione, molto potenti e con una ottima resistenza all'acqua.

In ambito minerario sono molto utilizzati per rocce dure e consistenti a causa delle quali è richiesto un esplosivo con elevate caratteristiche energetiche.



Gli esplosivi gelatinati sono composti, oltre che dalla nitroglicerina, anche dalla nitrocellulosa (nota anche come fulmicotone) e a seconda della loro composizione si differenziano in:

- Gelatine dinamiti, con una percentuale di nitrocellulosa superiore al 30%
- Gomme, con percentuali di nitroglicerina oltre il 90%

In commercio tra le diverse tipologie di esplosivi gelatinati, vengono riportati due esplosivi prodotti dall'azienda Italesplosivi S.P.A., i quali sono commercialmente identificati come “Gelatina I” e “Gomma A”. Di seguito vengono riportati alcuni parametri tecnici fondamentali per definire il loro effetto riguardo la bonifica dei versanti innevati, reperiti dal testo “L'esplosivo e la Neve” di Renato Cresta.

Gomma A:

- Velocità di detonazione: $7700 \frac{m}{s}$
- Massa volumica: $1,55 \frac{Kg}{dm^3}$
- Energia specifica: $6,74 \frac{MJ}{Kg}$

Gelatina I:

- Velocità di detonazione: $6550 \frac{m}{s}$
- Massa volumica: $1,45 \frac{Kg}{dm^3}$
- Energia specifica: $4,52 \frac{MJ}{Kg}$

3.3.4 Esplosivi contenenti acqua

In questa categoria di esplosivi rientrano due diverse tipologie molto utilizzate in ambito ingegneristico, ognuna delle quali con caratteristiche diverse. La particolarità degli esplosivi contenenti acqua è l'assenza, nella loro composizione, della nitroglicerina, la loro composizione infatti risulta essere costituita da una soluzione di nitrati in acqua, più alcune sostanze ausiliare. Oltre a rendere questa tipologia di esplosivo molto più resistente all'acqua rispetto ad altre tipologie, la loro composizione, in generale li rende sicuramente più sicuri dal punto di vista sia dell'utilizzo che della fabbricazione, inoltre l'assenza di nitroglicerina evita l'insorgere delle tipiche nausea e cefalee che in genere colpiscono chi maneggia questa

sostanza. Di contro però, gli esplosivi contenenti acqua, risultano essere meno stabili e deteriorabili con il tempo, il che rende difficoltoso il loro stoccaggio in fase di inutilizzo.

Le due tipologie possono essere identificate secondo la seguente nomenclatura:

- Slurries o Water Gel, esplosivi costituiti da una soluzione satura in acqua di sostanze ossidanti contenenti, in sospensione, elementi combustibili ed agenti sensibilizzanti che hanno il compito di conferire una migliore consistenza alla miscela.
- Emulsioni, esplosivi contenenti una percentuale rispetto alla sua composizione totale, di circa il 90% di una soluzione di nitrati in acqua con il restante 10% costituito da oli, cere e paraffine.

La differenza sostanziale tra gli slurries e le emulsioni risiede all'interno della loro struttura; difatti per quanto riguarda le emulsioni, queste risultano essere costituite da una matrice alveolare, rappresentante la fase oleosa combustibile con cere, oli e paraffine all'interno della quale è dispersa la soluzione concentrata di nitrati in acqua, rappresentante la fase acquosa ossidante.

Gli slurries invece risultano essere costituiti da un gel di base acquosa, prodotta grazie all'utilizzo di “guar gum” o di agenti polimerizzanti, all'interno della quale è dispersa la sostanza esplosiva, costituita perlopiù da nitrato d'ammonio ed altri agenti sensibilizzanti che fungono da “hot spots”, ovvero dei veri e propri siti di reinnesco della detonazione per garantire il proseguimento della reazione.

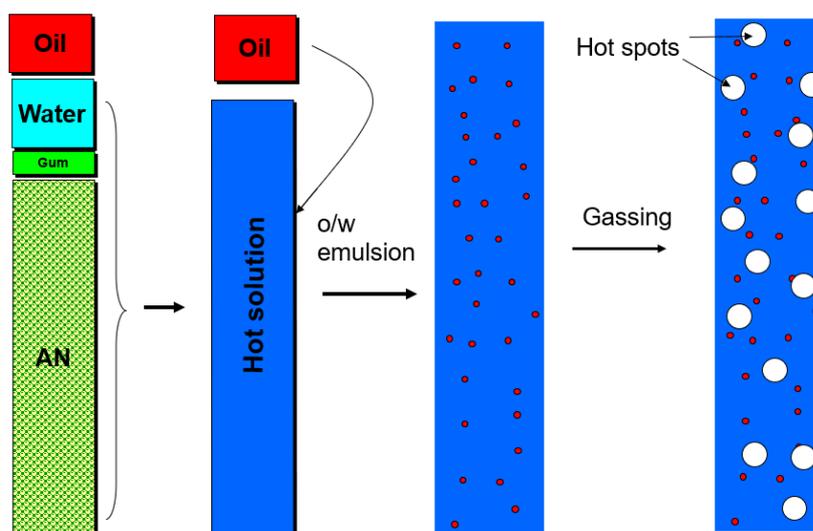


Figura 3.6- Schema di preparazione di uno Slurry
Fonte: “EFEE-2004”

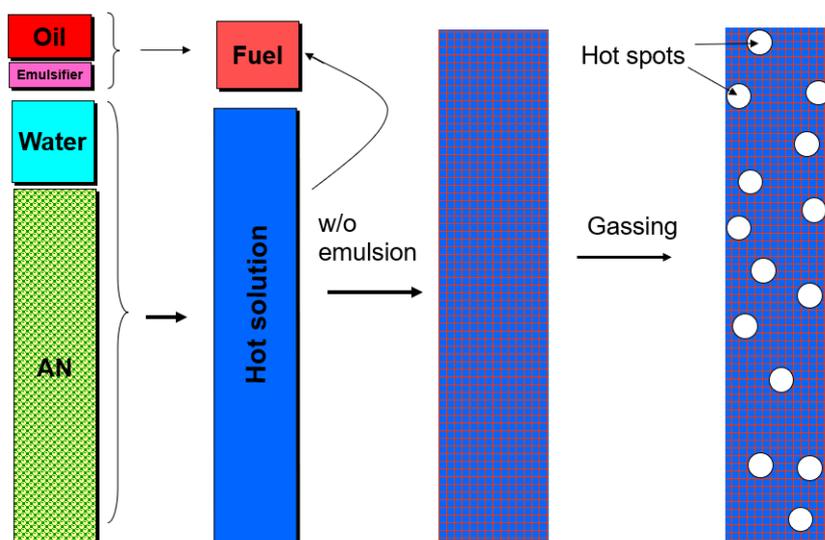
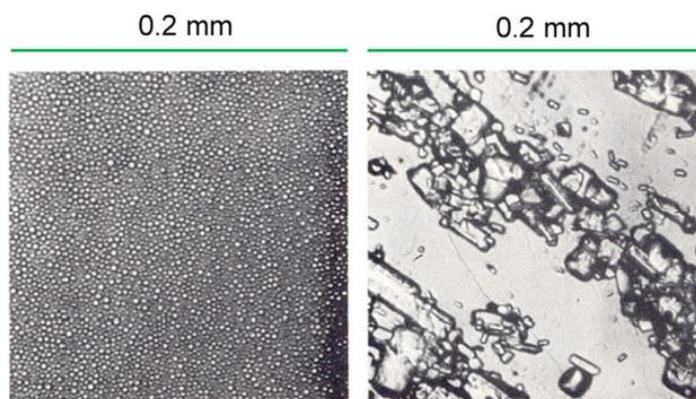


Figura 3.7- Schema di preparazione di una Emulsione
Fonte: “EFEE-2004”



**Figura 3.8- Differenza strutturale al microscopio tra
emulsione (a destra) e slurry (a sinistra)**
Fonte: “Atlas Powder-1987”

All’interno di **Figura 3.8** è possibile osservare la sostanziale differenza strutturale tra una emulsione (a sinistra) ed uno slurry (a destra), dall’esame al microscopio, si nota quindi come un’emulsione sia costituita da una dimensione delle particelle decisamente inferiori rispetto ad un water gel, con una miscelazione più regolare dei costituenti.

Per gli scopi prefissati all’interno di questo elaborato, si riportano quindi due esplosivi (uno slurry ed una emulsione), rispettivamente denominati Tutagex 210 e Premex 3300, entrambi prodotti dall’azienda italiana Pravisani S.P.A.



CARATTERISTICHE TECNICHE

		PREMEX 3300
Densità	[g/cm ³]	1,18 ± 0,05
Energia	[MJ/kg]	4,24
Velocità detonazione (Ø 50 mm)		
- in aria libera	[m/s]	5200
- in tubo metallico	[m/s]	5500
Volume di gas (T 25°C)	[l/kg]	935
Distanza di colpo (Ø 40 mm)	[mm]	> 80

Tabella 3.2- Caratteristiche tecniche Premex 3300
Fonte: “Pravisani s.p.a.”

Riguardo le caratteristiche tecniche dell’esplosivo Tutagex 210, queste sono state ricavate dal libro di Renato Cresta “L’esplosivo e la neve”, riportate in seguito:

- Velocità di detonazione: $4200 \frac{m}{s}$
- Massa volumica: $1,15 \frac{Kg}{dm^3}$
- Energia specifica: $3,52 \frac{MJ}{Kg}$

3.3 Effetti dell’esplosione sul manto nevoso

L’operazione di distacco artificiale preventivo di masse nevose, come qualsiasi operazione di bonifica, deve essere eseguita in modo tale da poter garantire la certezza d’effetto perseguibile in totale sicurezza sia per gli operatori che per i territori a valle o ad altri soggetti che potrebbero essere indirettamente coinvolti da una eventuale deviazione dalle condizioni di sicurezza progettuale.

La certezza d’effetto, nel caso di bonifiche di versanti innevati, non è sempre verificata, vista la mole eccessiva di variabili che possano interferire sull’esito del tiro, ma per garantire una probabilità di successo quanto più elevata possibile, è necessario conoscere e avere ben chiare quali siano le interazioni tra la neve e l’esplosivo in modo tale da poter pianificare al meglio il posizionamento delle cariche sul pendio oggetto di bonifica.

Gli effetti sul manto nevoso delle cariche esplosive, inoltre, non sono direttamente proporzionali alla massa di esplosivo fatta brillare, infatti, un aumento del peso della carica,

con l'intento errato di migliorarne le prestazioni, non si traduce necessariamente in un proporzionale miglioramento degli effetti.

Oltre alle caratteristiche intrinseche della carica ed alla valutazione del comportamento teorico del conseguente brillamento, è necessario valutare le condizioni al contorno all'interno delle quali il tiro viene eseguito.

Queste possono essere molteplici, e bisogna considerarne la quasi totalità di esse, e possono essere per esempio: l'altitudine alla quale il tiro viene eseguito, la temperatura, l'umidità e lo stato evolutivo del manto nevoso (metamorfismo), le quali potrebbero andare ad influire sia sull'esplosivo stesso, che sul manto nevoso, condizionandone il corretto esito del distacco.

Ogni distacco perciò, pur riguardando lo stesso pendio, non sarà mai uguale ai distacchi eseguiti in precedenza, poiché ad ogni operazione corrisponderanno diverse condizioni al contorno.

3.3.1 Trasmissione dell'onda d'urto e concetto di impedenza (Z)

Considerando una esplosione eseguita al di sopra del manto nevoso, è possibile osservare come l'onda d'urto, generata dall'esplosione di una carica sferica, andrà a propagarsi concentricamente al centro dell'esplosione attraversando materiali differenti come schematizzato all'interno della seguente figura.

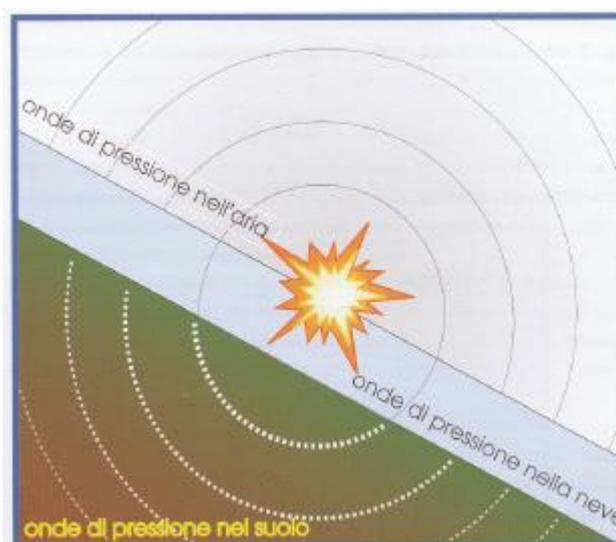


Figura 3.9- Distribuzione delle onde di pressione al seguito del brillamento di una carica sferica
Fonte: “Cresta R.-2002”



Come evidenziato, è possibile notare come l'onda d'urto, a seguito dell'esplosione si trasmetterà all'interno di tre diversi materiali, ognuno con diverse proprietà meccaniche e caratteristiche che ne andranno ad influenzare differenzialmente la propagazione della stessa.

Perciò di seguito verrà brevemente descritto il comportamento dell'onda d'urto all'interno dei 3 differenti materiali.

- Propagazione nell'aria: l'onda di pressione generata si propaga nell'aria sfericamente potendo essere sentita anche a grande distanza come onda sonora. Essendo l'aria un fluido, all'interno di essa verranno trasmesse solo ed esclusivamente le onde P (di compressione), a partire dal centro dell'esplosione stessa. Queste possono raggiungere ed interessare la superficie nevosa con un certo contenuto energetico, inversamente proporzionale alla distanza esistente tra la carica fatta brillare e la superficie del manto nevoso.
- Propagazione all'interno della neve: come evidenziato, all'interno dei capitoli precedenti, la neve risulta essere costituita da una determinata struttura reticolare, la quale forma più vuoti che pieni con un indice dei vuoti variabile a seconda del grado di metamorfismo caratteristico di quel determinato manto nevoso. Da questa considerazione se ne deduce come il comportamento della neve sia analogo a quello relativo alla propagazione dell'onda d'urto all'interno di rocce fortemente diaclasate, comportando uno smorzamento rapido dell'onda di pressione. La velocità delle onde di compressione, all'interno del manto nevoso, varia in un range molto ampio tra i 300 metri al secondo fino ai 3000. Tale variabilità è fortemente influenzata dalla struttura reticolare del manto stesso e dal tenore d'acqua ivi presente. E' perciò intuitivo aspettarsi velocità più elevate in nevi compatti ed in stati di metamorfismo più avanzati, mentre le velocità più basse, anche di un ordine di grandezza, si riscontreranno all'interno di coltri nevose fresche ed umide.
- Propagazione nel suolo: Il terreno è un mezzo all'interno del quale l'onda d'urto si trasmette in maniera più efficace rispetto che nella neve; ovviamente è necessario tener conto che la trasmissione dell'onda d'urto nel suolo è fortemente influenzata dalle caratteristiche del manto nevoso sovrastante, il quale, in base alla capacità di smorzamento di quest'ultimo determina una maggiore o minore trasmissione dell'onda d'urto nel suolo stesso. Inoltre la presenza di substrato ghiaioso, non coesivo o con presenza di vegetazione comporta uno smorzamento dell'onda; al



contrario in presenza di substrato marnoso, o rocce compatte, la trasmissione delle sollecitazioni indotte dall'esplosione può proseguire anche per grandi distanze, se non smorzate eccessivamente all'interno dello strato nevoso.

Come appena evidenziato nelle considerazioni precedenti, l'onda d'urto generata dal brillamento della carica sul manto nevoso, è costretta ad attraversare tre diversi materiali ciascuno dei quali con sostanziali differenti caratteristiche meccaniche.

Per questo motivo si ritiene opportuno descrivere gli aspetti principali, riguardanti la trasmissione delle sollecitazioni all'interno dei diversi mezzi materiali, a partire dal concetto di impedenza.

L'onda s'urto, come il suono, è un fenomeno di propagazione all'interno del mezzo, il parametro che influisce maggiormente sulla trasmissione delle sollecitazioni da un mezzo ad un altro con caratteristiche meccaniche differenti, è l'impedenza.

Tale parametro viene definito come il prodotto della densità del mezzo per la velocità di propagazione dell'onda all'interno dello stesso. Per cui è possibile esprimere il concetto di impedenza tramite la seguente equazione 3.1.

$$Z = \rho_0 V \quad (3.1)$$

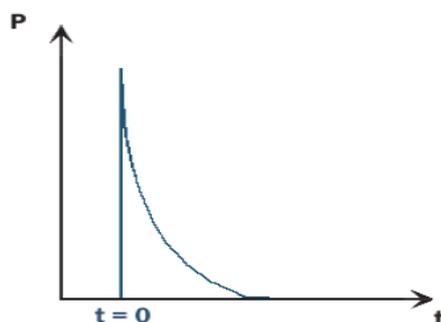
Considerando quindi la precedente espressione, dal momento che la neve è caratterizzata da una maggiore densità ed una maggiore velocità di trasmissione delle sollecitazioni rispetto all'aria, si può trarre la conclusione per la quale, l'impedenza della neve risulta essere maggiore rispetto alla stessa grandezza riferita all'aria.

Un'altra considerazione è possibile farla considerando le pressioni sprigionate a causa della propagazione dell'onda d'urto all'interno dei differenti mezzi. La pressione P e la velocità delle particelle (v), situate nella zona retrostante il fronte dell'onda, risultano essere correlate all'impedenza tramite la seguente relazione, riportata all'interno dell'equazione 3.2.

$$P = Z v = \rho_0 V v \quad (3.2)$$

Da cui se ne deduce che, in neve, a parità di velocità delle particelle v , essendo l'impedenza maggiore piuttosto che in aria, le pressioni maggiori si riscontrano all'interno del primo mezzo piuttosto che nel secondo.

Riportando infine, su di un grafico pressione vs tempo, l'andamento delle pressioni derivanti dalla propagazione dell'onda d'urto, tralasciando gli effetti di fenomeni di riflessione e rifrazione, all'interno di un generico mezzo, si ottiene la seguente curva, riportata un Figura.



**Figura 3.9- Picco di pressione in funzione del tempo
(grafico qualitativo)
Fonte: “Cresta R.-2002”**

La curva riportata in precedenza può essere descritta tramite una equazione di tipo esponenziale, riportata all'interno della seguente equazione 4.3.

$$P(t) = P_{max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.3)$$

All'interno della quale:

- $P(t)$ è il valore di pressione registrato nel generico istante di tempo t
- P_{max} è il valore di picco della pressione
- τ è la costante di tempo, rappresenta il tempo necessario, affinché la pressione decada di circa 1/3 rispetto a quella di picco.

Il grafico, come già espresso in precedenza, è qualitativo, valido per qualsiasi mezzo nel caso in cui, quest'ultimo, fosse unico ed omogeneo per tutta la sua estensione.

In realtà, l'attenuazione dell'onda d'urto, non segue nei casi reali il grafico precedentemente riportato, ma a causa dei fenomeni di riflessione e di rifrazione che avvengono all'interfaccia di separazione tra un mezzo e l'altro, subisce sostanziali modifiche.



Di seguito è schematizzato il fenomeno della riflessione dell'onda d'urto al passaggio all'interfaccia di separazione tra due mezzi, definiti come mezzo 1 e mezzo 2.

1. L'onda d'urto si propaga all'interno del mezzo 1 e raggiunge l'interfaccia di separazione, a questo punto si verifica un regime stazionario infinitesimo all'interno del quale, sia la pressione P , che la velocità delle particelle retrostanti al fronte d'onda v , si eguagliano.
2. Successivamente, l'onda transita all'interfaccia e, tenendo conto del concetto di impedenza del materiale, è possibile osservare:

Un'onda incidente, proveniente dal primo mezzo con pressione P_1 e velocità delle particelle v_1 , ricordando l'equazione 4.2 si ha che:

$$P_1 = Z_1 v_1 \quad (3.4)$$

In cui Z_1 è l'impedenza del materiale del mezzo 1.

Un'onda rifratta, che attraversa l'interfaccia trasmettendosi nel mezzo 2, in cui continuerà il suo percorso, con pressione P_2 e velocità v_2 , per cui si avrà:

$$P_2 = Z_2 v_2 \quad (3.5)$$

Un'onda riflessa che rimbalza all'interfaccia tra mezzo 1 e mezzo 2 torna indietro e si propaga nuovamente all'interno del mezzo 1. La pressione e la velocità dell'onda riflessa saranno definite dalle seguenti relazioni:

$$P_{rifl} = P_1 - P_2 \quad (3.6)$$

$$v_{rifl} = v_1 - v_2 \quad (3.7)$$

Caso 1: il mezzo 1 ha impedenza maggiore rispetto al mezzo due ($Z_1 > Z_2$)

$Z_1 > Z_2$ implica una maggiore comprimibilità del mezzo 2 piuttosto che del mezzo 1, essendo l'impedenza direttamente proporzionale alla densità del materiale che costituisce il mezzo.



Da ciò ne deriva che, l'onda trasmessa all'interno del mezzo 2 ha una pressione inferiore rispetto alla pressione dell'onda riflessa all'interno del mezzo 1 ($P_1 > P_2$).

Infine, la velocità delle particelle del mezzo 2 è maggiore rispetto alla stessa velocità all'interno del mezzo 1 ($v_1 < v_2$).

Caso 2: il mezzo 1 ha impedenza minore rispetto al mezzo due ($Z_1 < Z_2$)

Da ciò ne deriva come il mezzo 2 risulti essere meno comprimibile rispetto al mezzo 1, da ciò, viste le considerazioni fatte in precedenza se ne deduce che la pressione del mezzo 2 è maggiore rispetto alla pressione all'interno del mezzo 1 ($P_1 < P_2$).

L'onda riflessa generata all'interno del mezzo 1, è un'onda di compressione la quale provoca un incremento della pressione, e, di conseguenza è possibile dedurre che la velocità delle particelle, all'interno del mezzo 1, risulta essere maggiore rispetto alla velocità delle particelle all'interno del mezzo 2 ($v_1 < v_2$).

3.4 Effetti dell'esplosivo sul manto nevoso in funzione del suo posizionamento

La risposta del manto nevoso soggetto ad un carico istantaneo ed impulsivo, come quello rappresentato da un'esplosione, risulta essere assai differente a seconda del posizionamento della carica in relazione con la distanza dalla superficie del manto stesso.

Per questo motivo, nei paragrafi successivi, verranno descritte le teorie e le evidenze empiriche/sperimentali, relative ai diversi casi seguenti:

- Posizionamento della carica all'interno del manto nevoso
- Carica appoggiata sulla superficie del manto
- Carica sospesa a differenti altezze dalla superficie del manto nevoso

3.4.1 Posizionamento della carica nel manto nevoso

Il primo caso esaminato, è relativo all'inserimento ed al successivo brillamento della carica, all'interno del manto nevoso.

Il brillamento della carica all'interno della neve, causa un repentino ed elevato aumento di pressione nei punti limitrofi al centro dell'esplosione. Ciò è causato dai gas, che si sviluppano a seguito dell'esplosione, caratterizzati da elevatissime temperature.

All'interno di questo raggio, nei dintorni dell'esplosione, si ha vaporizzazione della neve, mentre, a distanze maggiori si avrà frantumazione, compressione e proiezione a grande distanza degli agglomerati di neve.

Dalla composizione di tutti questi effetti il risultato finale è ben visibile, e si tratta di un cratere dai bordi rialzati e con il caratteristico profilo riportato all'interno della seguente figura.

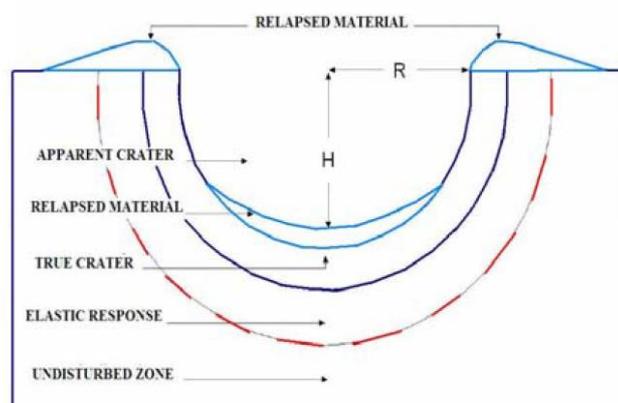


Figura 3.10- Forma del cratere in seguito dell'esplosione
Fonte: “B.Frigo, M.Cardu, B.Chiaia.-2012”

L'effetto visibile, a seguito dell'esplosione, è simile a quello riportato nella figura precedente ma, nel caso in cui la profondità di posizionamento della carica risultasse essere eccessiva, non si riscontrerebbe alcuna evidenza visiva in superficie.

Quando si verifica la condizione precedente, si parla di effetto “fumacchio”, ovvero il caso in cui la carica è ad una profondità tale per cui i suoi effetti non raggiungono la superficie del manto nevoso.

Per comprendere le relazioni empiriche, che verranno riportate e discusse in seguito, è utile richiamare e citare gli studi, condotti nel 1956, da parte di Livingstone, secondo il quale, esiste sempre un fattore di proporzionalità costante, tra la profondità critica della carica e la



radice cubica della massa di esplosivo espressa in TNT_{eq} , per uniformare i risultati a ciascun esplosivo.

La relazione di Livingston è riportata nella seguente equazione 3.8.

$$N_c = E \sqrt[3]{W} \quad (3.8)$$

All'interno della quale:

- E , è la costante di proporzionalità critica, differente per ciascun tipo di accoppiamento roccia-esplosivo
- N_c , è la profondità critica di posizionamento della carica
- W , è la massa di esplosivo in TNT_{eq}

Inoltre, si ritiene opportuno specificare:

- Con profondità critica si intende la profondità massima di affondamento, a partire dalla quale è possibile osservare il primo segno visibile in superficie, dovuto al brillamento della carica.
- Con TNT_{eq} , si intende la massa di TNT necessaria per ottenere gli stessi effetti di una determinata massa di un altro generico esplosivo.
- Le relazioni di Livingston, sono ricavate da analisi relative ad accoppiamenti roccia-esplosivo.

La formula 4.8, può inoltre essere riscritta per una generica altezza di affondamento della carica, inserendo un coefficiente adimensionale di profondità, come riportato all'interno della seguente equazione 4.9:

$$N_g = \Delta E \sqrt[3]{W} \quad (3.8)$$

In cui:

- N_g , è la distanza dalla superficie al centro di gravità della carica diversa da quella critica.
- Δ , è definito come relazione di profondità dato da $\frac{N_g}{N_c}$



A questo punto, avendo descritto in breve e senza scendere nel dettaglio la teoria della craterizzazione di Livingston, è possibile riportare le relazioni empiriche (tratte da Cresta 2002, “l’Esplosivo e la Neve”) di seguito riportate.

$$H = 0,75 \sqrt[3]{W} \quad (3.9)$$

$$H = 1,50 \sqrt[3]{W} \quad (3.10)$$

Le due equazioni sopra riportate sono relative rispettivamente al cratere massimo ed alla profondità di affondamento della carica in neve tale per cui si ottiene il fenomeno del fumacchio, infatti, al di sotto di tale profondità, non si dovrebbero riscontrare effetti visibili in superficie.

3.4.2 Carica appoggiata in superficie

L’esplosione in superficie è un tecnica molto utilizzata per il distacco artificiale delle valanghe perché rappresenta uno dei metodi più economici e speditivi in quanto, a questa categoria di tecniche, è possibile ricondurre quelle operazioni di lancio dell’esplosivo a mano o per scivolata lungo il pendio, tecniche per le quali si evitano i costi di costruzione e manutenzione come nel caso degli impianti fissi.

Di particolare interesse, per comprendere gli effetti di un’esplosione sulla superficie del manto nevoso, sono gli studi condotti da Mellor (USA), il quale prese in considerazione il principio per cui, la pressione minima e sufficiente a provocare il distacco è pari a 30 mbar, ovvero la pressione media esercitata sul manto nevoso dal transito di uno sciatore.

Mellor ricavò da una serie di osservazioni sperimentali, un grafico attraverso il quale è possibile correlare i valori di pressione esercitati dall’esplosione sul manto nevoso a diverse distanze dal centro dell’esplosione stessa.

Il grafico e le relazioni ricavate da Mellor, inoltre, sono frutto di sperimentazioni condotte in campo libero per un esplosione di una carica sferica di 1 Kg di TNT, con misura delle pressioni effettuate attraverso dei manometri posti a diverse distanze.

L’assunzione delle cariche sferiche permette di poter considerare come sferica, anche la propagazione dell’onda d’urto, ciò rende possibile stabilire un valore del raggio di influenza

R, ovvero la distanza massima alla quale si verifica una pressione sufficiente ad ottenere un distacco (30 mbar), come evidenziato all'interno di **Figura 3.11**.

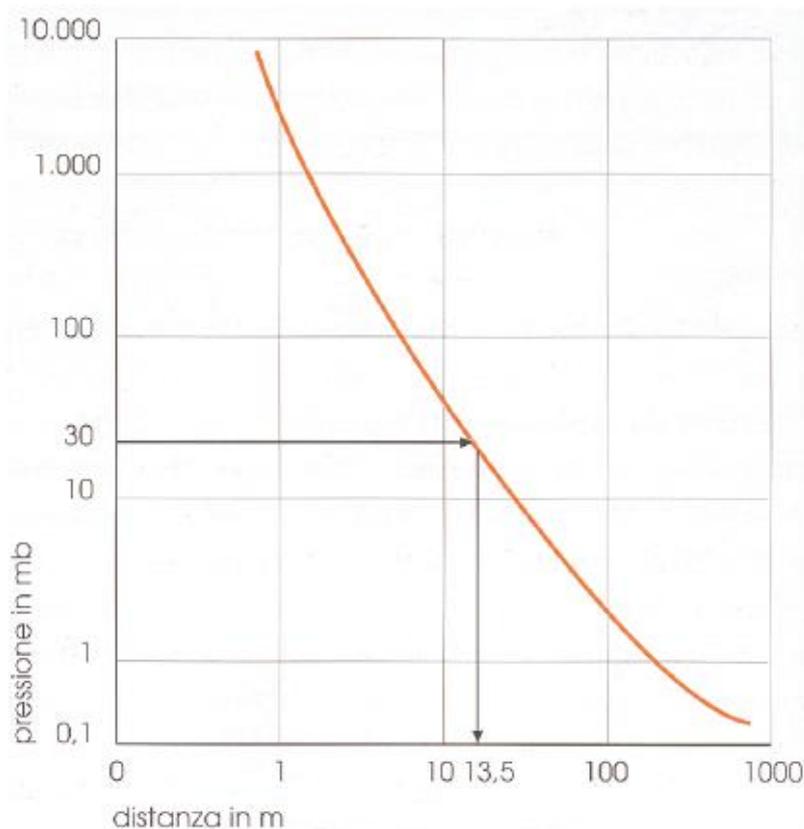


Figura 3.11- Grafico di Mellor
Fonte: “Cresta R.-2002”

Come si evince dal grafico di Figura 3.11, la distanza massima alla quale 1 Kg di TNT in campo libero, genera una pressione pari a 30 mbar, è pari a 13,5 m.

Il grafico di Mellor ovviamente rappresenta delle condizioni standard di accoppiamento esplosivo-neve, però consente di poter scalare gli effetti dedotti dal grafico sperimentale, per un qualsiasi tipo di esplosivo esprimendo la massa di quest'ultimo in Kg di TNT_{eq}.

La relazione trovata da Mellor, per valutare il raggio efficace di una carica esplosiva posta sulla superficie del manto nevoso, è riportata all'interno della seguente equazione:

$$R = 13,5 \sqrt[3]{W} \quad (3.11)$$

Dall'equazione 3.11, è possibile osservare come la relazione tra raggio efficace e massa di esplosivo utilizzata, non sia lineare. Questo implica che per raddoppiare gli effetti



dell'esplosione sul manto nevoso, non è sufficiente raddoppiare la carica, ma è necessario aumentarla enormemente.

Considerando infatti il caso del kg di tritolo utilizzato per gli esperimenti di Mellor, e considerando l'equazione 3.11, osservando inoltre i semplici calcoli riportati di seguito, è possibile dimostrare quanto espresso in precedenza.

Raddoppiare l'effetto utile che si otterrebbe con 1 Kg di TNT, vuol dire estendere il raggio efficace fino ad una lunghezza pari a:

$$R = 13,5 \text{ m} * 2 = 27 \text{ m}.$$

Sostituendo il valore appena ricavato all'interno della 4.11, tramite semplici passaggi algebrici è possibile ottenere il valore della carica di TNT necessaria ad ottenere tale valore di R.

$$W = \left(\frac{R}{13,5}\right)^3 = \left(\frac{27}{13,5}\right)^3 = 2^3 \text{ Kg}$$

Da ciò si evince che per raddoppiare gli effetti di una carica di 1 Kg di TNT, è necessario elevare al cubo il doppio della carica di partenza.

Questa considerazione, potrebbe far pensare, erroneamente, che la soluzione più efficace ed ovvia per garantire il distacco della valanga, possa essere quella di esagerare con la massa di esplosivo, sovradimensionando le cariche.

Ciò non è possibile e potrebbe risultare estremamente pericoloso, sia per l'utilizzo della carica stessa da parte degli operatori, sia per problemi legati ai territori limitrofi, i quali potrebbero essere a loro volta interessati dall'esplosione causando un distacco di neve eccessivo e pericoloso per i territori a valle, in quanto non previsto ed incontrollato.

3.4.3 Carica sospesa

Un'esplosione in aria si propaga sfericamente fino a raggiungere la superficie del manto nevoso, con energia tanto maggiore quanto minore è l'altezza del punto di scoppio, inoltre il picco di pressione già ad una breve distanza dal centro dell'esplosione subisce una significativa riduzione.

Il concetto appena enunciato è genericamente valido, ma per comprendere al meglio il fenomeno della propagazione dell'onda d'urto per una esplosione ad una certa altezza dal suolo, è utile richiamare gli studi condotti da Froböse.

Nel momento in cui l'onda raggiunge la superficie del manto nevoso, o qualsiasi altra superficie, essa subisce una riflessione che, in base alla distanza del punto di scoppio dal suolo, genera due domini di riflessione:

- Dominio in cui l'onda viene riflessa regolarmente
- Dominio di propagazione dell'onda di Mach

Tale suddivisione in domini fu individuata appunto da Froböse il quale, utilizzando una carica di 750 g di hexolite 50/50, posta ad un'altezza di 0,76 m, ottenne la curva limite che suddivide i due domini di riflessione precedentemente enunciati, come riscontrabile all'interno di **Figura 3.12**.

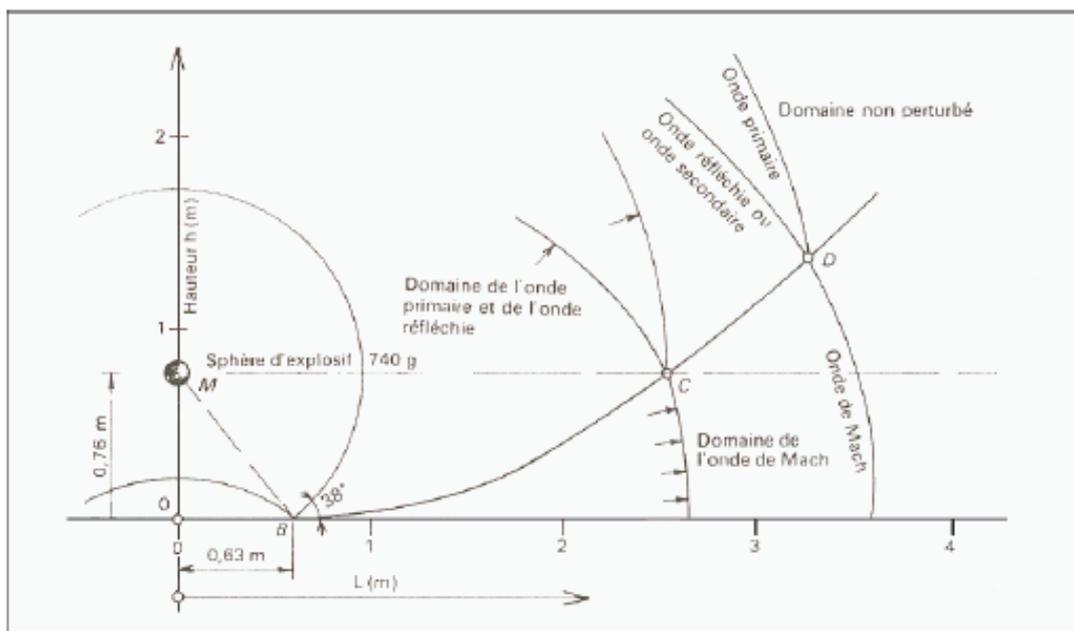


Figura 3.12- Curva limite di Froböse
Fonte: “Calzia J.-1969”

Oltre agli esperimenti attraverso i quali ottenne il grafico precedente, Froböse condusse ulteriori studi per valutare i valori dei picchi di pressione indotti da esplosioni di una stessa carica posta a differente altezza dal suolo. Il risultato ottenuto Froböse è riportato all'interno di **Figura 3.13**.

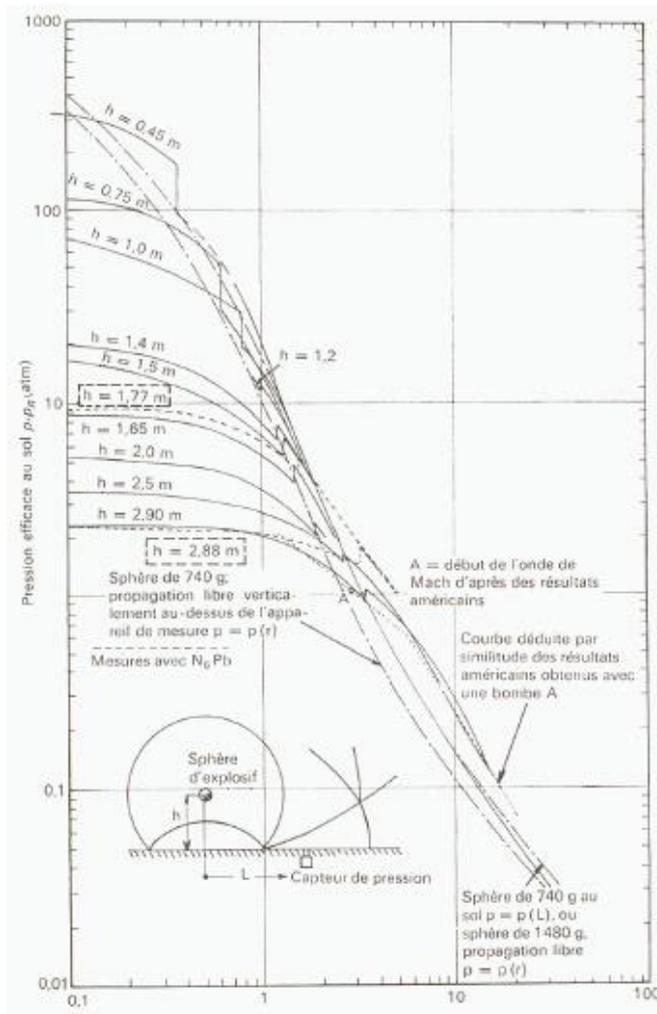


Figura 3.13- Picchi di pressione indotti a diversa altezza della carica
Fonte: “CalziaJ.-1969”

Dalla figura precedente si osserva l’esistenza di una certa correlazione tra altezza di tiro, picco di pressione e distanza. Nello specifico maggiore è l’altezza di tiro minore è il picco di pressione al suolo, ma di contro, maggiore è l’altezza di tiro maggiore è la distanza alla quale si registra il picco di pressione, riferito a quella determinata combinazione carica/altezza dell’esplosione.

Come già descritto in precedenza, all’onda d’urto segue un’onda retrograda la quale risulta essere disturbata dalla presenza di onde di choc; quest’ultime vengono generate a causa sia delle caratteristiche della carica (eterogeneità e forma della stessa), sia a causa della riflessione dell’onda d’urto all’interfaccia tra esplosivo ed aria o altri materiali a differenti caratteristiche meccaniche.

Le onde di choc, generate dalla riflessione dell'onda d'urto, si propagano di moto opposto all'onda retrograda, in quanto le prime si muovono di moto centripeto, le seconde di moto centrifugo, interferendo tra di loro e conseguentemente causando un'attenuazione dell'onda retrograda stessa.

Dagli studi di Froböse, successivamente altri studiosi, hanno preso spunto per studiare il fenomeno dell'esplosione delle cariche sferiche in aria, uno degli studi più recenti fu condotto da Ingram, il quale utilizzando una carica di 1 kg di TNT, riuscì a ricavare un grafico attraverso il quale si osserva una correlazione tra la sovrappressione (in bar) indotta dall'esplosione in funzione della distanza e dell'altezza di tiro scalata, in cui con il termine scalata si intende, in questo caso, la grandezza rapportata alla massa della carica utilizzata.

Il grafico ottenuto da Ingram e ricavato dal libro “L'esplosivo e la neve” di Renato Cresta, è riportato all'interno della seguente **Figura 3.14**.

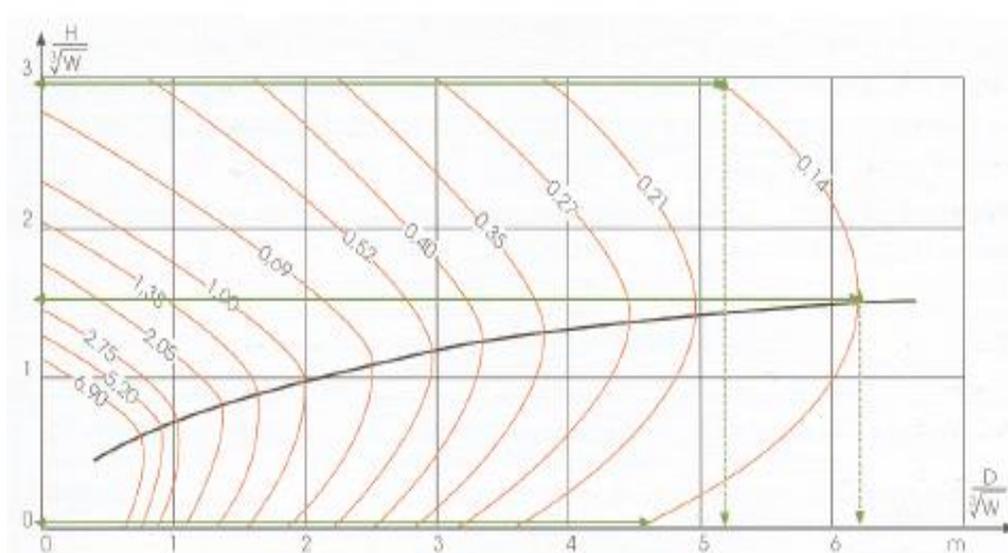


Figura 3.14- Grafico di Ingram
Fonte: “Cresta R.-2002”

Dal grafico di Ingram è quindi possibile valutare gli effetti di un'esplosione di una generica carica, convertendola in TNT_{eq} . Considerando sempre il grafico di Figura 3.14, è possibile osservare, a titolo di esempio, che una sovrappressione di 0,21 bar, la si ottiene ad una distanza scalata di circa 3,8 m per una quota di tiro scalata di circa 2,9 m; la stessa sovrappressione la si ottiene per una distanza scalata di circa 5 m per una inferiore quota di tiro scalata pari a circa 1,3 m.

Altro aspetto importante, risulta essere correlato all'efficacia del tiro in aria, da considerazioni sul grafico tramite interpolazione delle varie curve è possibile notare come, considerando una generica distanza scalata dal punto zero, esista un'altezza di tiro per la quale la sovrappressione registrata al suolo in quel punto risulta essere massima. Da ciò se ne deduce che un tiro in aria, se posizionato ad un'altezza ottimale che ne massimizzi gli effetti al suolo, risulta essere più efficace rispetto al brillamento di una stessa carica all'interno del manto nevoso, in superficie o ad una quota diversa da quella ottimale.

A dimostrazione di quanto appena espresso, si riporta un grafico (**Figura 3.15**) ed una tabella (**Tabella 3.3**) in cui è possibile osservare la netta differenza, in termini di percentuale di successo dell'intervento, in base al posizionamento della carica rispetto al manto nevoso.

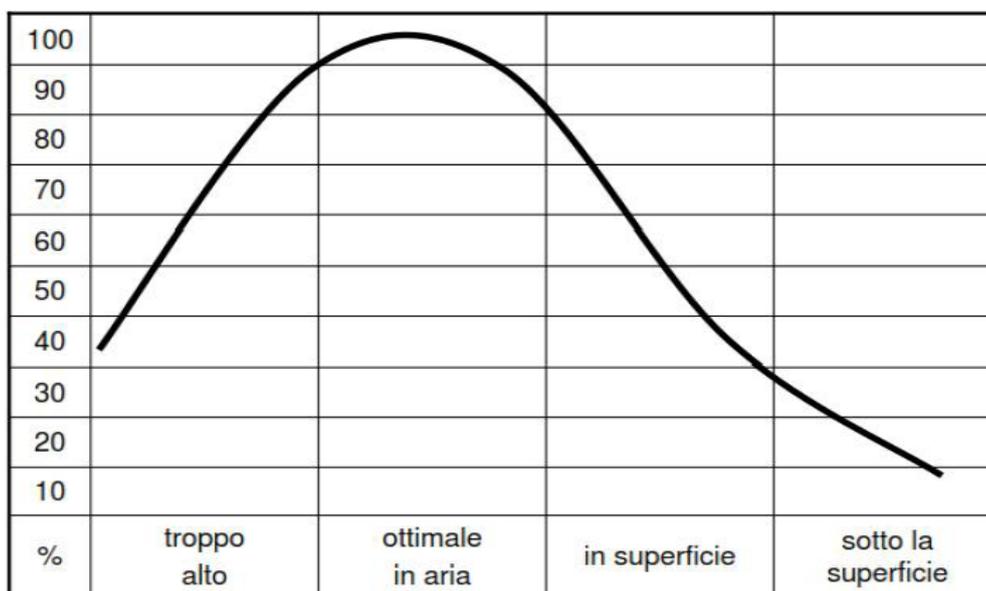


Figura 3.15- Percentuale di successo del distacco artificiale in funzione della posizione della carica
Fonte: “Cresta R.-2002”



Posizionamento	% successo	Effetti
In aria (in posizione ottimale)	>90 %	Gli strati più deboli sono sollecitati e giungono a rottura a causa della vibrazione dei cristalli di neve dovuta all’onda di pressione generata dall’esplosione
Sulla superficie del manto	50 ÷ 60 %	Si generano deformazioni localizzate della struttura del manto nevoso; l’onda di pressione si distribuisce per distanza più ridotte dal centro dell’esplosione, a parità di carica
All’interno del manto	< 10 %	A causa delle scarse caratteristiche meccaniche della neve, anche nel caso di carica ben intasata, si producono deformazioni del manto nevoso molto più localizzate, la sovrappressione si dissipa molto più rapidamente ed a distanza più brevi

**Tabella 3.3- Tabella riassuntiva percentuale di successo in
 funzione della posizione della carica
 Fonte: “Cresta R.-2002”**

Capitolo 4. Modello per l’innescò di valanghe di neve

4.1 Equilibrio del manto nevoso

La comprensione e l’analisi degli effetti indotti dal brillamento di esplosivi, o di altri sistemi per l’innescò artificiale di valanghe sulla neve, non può prescindere dalla conoscenza dei meccanismi che regolano l’equilibrio della neve sui versanti.

Dallo studio di A. Roch si evidenzia come a diverse caratteristiche del manto nevoso, corrispondano diversi valori di angoli di attrito statico e dinamico, i quali rappresentano due parametri fondamentali per l’equilibrio del manto nevoso che possono essere così definiti:

- Angolo di attrito statico: è l’angolo massimo di inclinazione oltre il quale i cristalli di un certo tipo di neve, disaggregati, si metterebbero spontaneamente in moto
- Angolo di attrito cinetico: è l’angolo minimo di inclinazione sul quale i cristalli, già in moto, continuano nel loro movimento

I valori di angoli di attrito, statico e dinamico, sono stati ricavati sperimentalmente da A. Roch, utilizzando una tavola inizialmente in quiete sopra la quale vengono accatastati i cristalli di neve.

Inizialmente, mantenendo la tavola in quiete, i cristalli restano in equilibrio fino al raggiungimento di un angolo di inclinazione limite della tavola, specifico per ogni tipo di cristallo (angolo di attrito statico).

Successivamente, mettendo in vibrazione la tavola, un certo quantitativo di massa nevosa si mette in moto rotolando lungo i fianchi, tale movimento si arresta, creando un nuovo cumulo di massa nevosa, nel momento in cui viene raggiunto un nuovo valore angolare di inclinazione (angolo di attrito cinetico).

Roch ha quindi individuato sperimentalmente i due diversi valori di angolo di attrito ricavando infine il seguente grafico, in cui, in ascissa è riportato il tempo, in giorni, necessario per la formazione di quella determinata tipologia di cristalli nelle condizioni di laboratorio (temperatura pari a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed umidità $<20\%$). Sull’asse delle ordinate sono riportati i diversi valori dell’angolo di attrito.

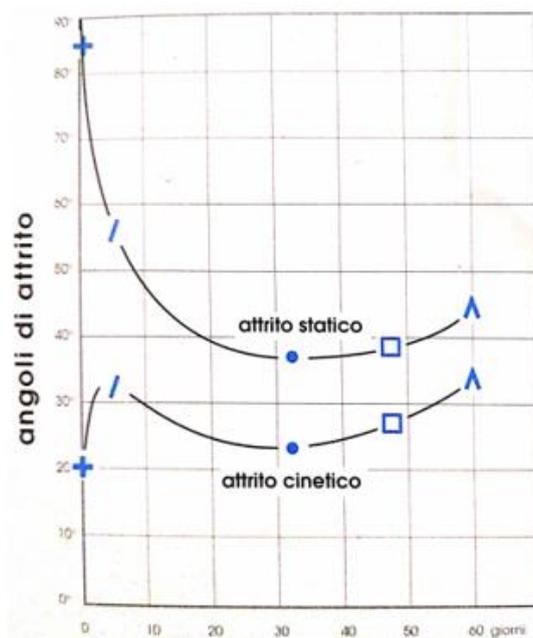


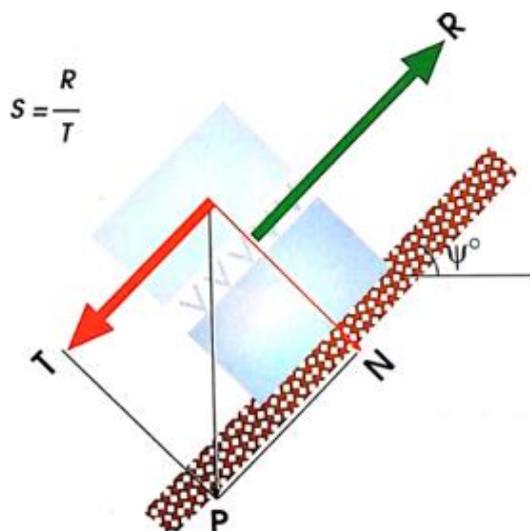
Figura 4.1 - riduzione dell'angolo di attrito per i diversi tipi di cristalli, in funzione del tempo a seguito del metamorfismo
Fonte: “Cresta R.-2002”

Schematizzando il manto nevoso sul pendio come suggerito da A. Roch, ovvero assumendo il pendio di inclinazione uniforme ed indefinitamente esteso in modo da poter trascurare gli effetti marginali, è possibile determinare la stabilità (**S**) come il rapporto tra la resistenza al taglio dello strato più debole (**R**), fornita dalla coesione e dal valore di attrito statico, e la sollecitazione al taglio esercitata sul manto nevoso (**T**), dovuta alla componente del peso del manto nevoso sovrastante lo strato più fragile, valutata nel senso di inclinazione del pendio.

$$S = \frac{R}{T}$$

E' immediato quindi capire come per valori di resistenza inferiori alla sollecitazione si verifichi la rottura, al contrario per valori di resistenza superiori alla sollecitazione al taglio la rottura non si verifica.

Di seguito è riportata la schematizzazione del pendio con inclinazione uniforme ed indefinitamente esteso come inteso da A. Roch.



**Figura 4.2 - Schematizzazione pendio indefinitamente esteso
con inclinazione uniforme
Fonte: “Cresta R.-2002”**

La perdita di resistenza e la conseguente rottura possono essere identificati attraverso tre diversi fenomeni, i quali vengono descritti sinteticamente all'interno dei paragrafi successivi.

4.1.1 Perdita di resistenza per cedimento dello strato fragile

La resistenza all'interno dei diversi strati di neve, in particolar modo all'interno dello strato più fragile, può ridursi a causa di fenomeni fisici e meccanici i quali possono essere ricondotti essenzialmente a due motivi principali:

- Aumento della temperatura dell'aria
- Metamorfismo

Ad un cambiamento delle condizioni atmosferiche nello specifico ad un aumento della temperatura dell'aria, ne consegue anche un aumento della temperatura del manto nevoso che in alcuni casi, nel momento in cui viene raggiunta o superata la temperatura di fusione (0 °C), perde completamente di resistenza.

I metamorfismi, invece, modificano la forma e i rapporti tra i diversi cristalli di un medesimo strato generando in alcuni casi una perdita di resistenza dovuta alla riduzione o alla totale scomparsa della coesione tra i diversi cristalli che compongono il manto nevoso.

In definitiva, un cambiamento di stato dei cristalli di neve dovuti ad un aumento di temperatura o a metamorfismi, comporta una riduzione della coesione che può generare una

perdita di resistenza. Nel momento in cui la neve perde di coesione, i cristalli di neve si mettono in movimento, ciò comporta una riduzione dell'angolo di attrito statico della neve ad angolo di attrito dinamico, che come si evince all'interno del grafico di **Figura 4.3**, risulta essere inferiore al primo.

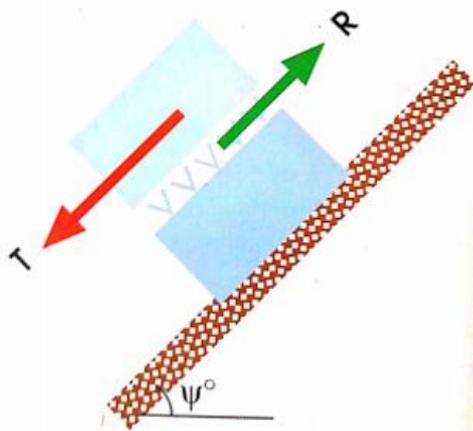


Figura 4.3- Perdita di resistenza per cedimento dello strato fragile
Fonte: “Cresta R.-2002”

4.1.2 Aumento della sollecitazione per eventi naturali

Le sollecitazioni al taglio possono aumentare in maniera istantanea e rapida, ma anche in maniera progressiva quindi lentamente.

Il secondo caso è tipico di quei manti nevosi adagiati su pendii soggetti a nuove nevicate. Le nevicate, soprattutto se abbondanti, causano un progressivo sovraccarico del manto nevoso, dovuto all'accumularsi di una nuova massa nevosa sopra di esso. Ciò può condurre ad un valore di sollecitazione tale per cui venga superato il valore limite di equilibrio, causandone un distacco spontaneo della massa nevosa.

Nel momento in cui avviene il distacco spontaneo, la propagazione del movimento della massa nevosa, si estende su tutto il pendio di eguale inclinazione.

E' interessante osservare come, nei casi di abbondanti nevicate, il valore di equilibrio limite della massa nevosa sul pendio, è raggiunto prima sui versanti con maggiore inclinazione e, successivamente anche all'interno dei pendii meno acclivi.

Da ciò è immediato valutare come nel caso di pendii più acclivi, la massa nevosa si scarica in tempi relativamente brevi, con conseguenti accumuli di neve messi in movimento modesti.

In pendii meno ripidi, per raggiungere il valore di equilibrio limite, è necessario un accumulo di neve più importante per innescare la valanga, ciò comporta, in questi casi, che il volume che può mettersi in movimento potrebbe raggiungere dimensioni importanti aumentandone la pericolosità per i territori a valle.

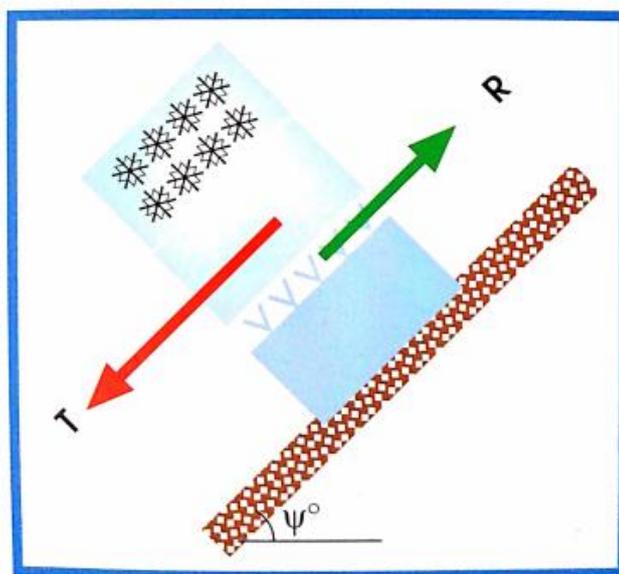


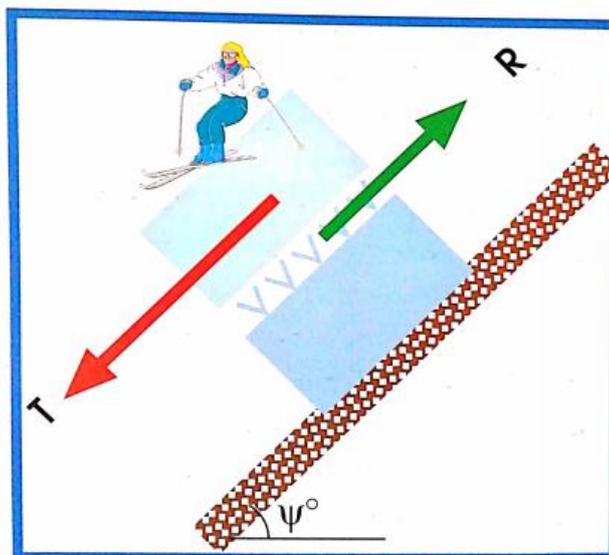
Figura 4.4- Aumento della sollecitazione per sovraccarico per eventi naturali
Fonte: “Cresta R.-2002”

4.1.3 Aumento di sollecitazione per eventi accidentali o volontari

L'aumento di sollecitazione, come evidenziato all'interno del paragrafo precedente, può avvenire anche in maniera istantanea e rapida.

Questo si verifica nel momento in cui interviene una causa esterna come per esempio il passaggio di sciatori o appunto il brillamento di una carica esplosiva, tema centrale di questo elaborato.

Il passaggio degli sciatori, causa un repentino aumento delle sollecitazioni che può causare il superamento della resistenza dello strato più debole, il quale non offre più contributo alla resistenza del pendio.



**Figura 4.5- Aumento della sollecitazione per sovraccarico per eventi
accidentali**
Fonte: “Cresta R.-2002”

Al contrario del caso del distacco spontaneo per accumulo, in cui la sollecitazione era estesa per tutto lo sviluppo del pendio, in questo caso la sollecitazione è limitata alla superficie interessata dalla causa accidentale che ne abbia determinato la perdita di resistenza.

Da ciò si evince come in questo caso, per far sì che si verifichi il distacco del manto nevoso, il movimento iniziale, causato dall’evento accidentale debba propagarsi per tutto il tratto del pendio e, tale possibilità di propagazione, è correlata al grado di stabilità ed al volume di neve mobilitato dalla causa accidentale.

In conclusione, si è visto come il manto nevoso possa raggiungere la rottura ed il conseguente distacco in seguito all’applicazione di uno stimolo che ne determini un sovraccarico.

Tale sovraccarico può essere applicato lentamente, come nel caso di accumulo di nuova massa nevosa, producendo una deformazione viscosa.

Nel caso in cui il sovraccarico venga applicato in maniera rapida, come nel caso del passaggio di uno sciatore, allora si verificheranno microrotture ed assestamenti; infine, considerando il caso di una esplosione, il sovraccarico viene applicato in maniera istantanea e, a seguito del brillamento delle cariche, si ottengono deformazioni e rotture.

Da ciò si evince che quanto più rapidamente venga applicato lo stimolo esterno, che ne determini l’instabilità del manto nevoso, tanto più rapidamente si raggiunge il limite di

rottura, il quale risulta essere di molto inferiore nel caso di applicazione del carico istantaneo piuttosto che nel caso di applicazione lenta.

All'interno del grafico qualitativo di **Figura 3.20**, è possibile osservare il comportamento del manto nevoso quando sottoposto alle tre diverse tipologie di carico precedentemente descritte; si nota infatti come il campione di neve, prima di cedere definitivamente, può sostenere una certa serie di sollecitazioni nel caso di sovraccarico rapido e lento; mentre il limite di rottura è raggiunto istantaneamente in seguito all'applicazione di un sovraccarico istantaneo.

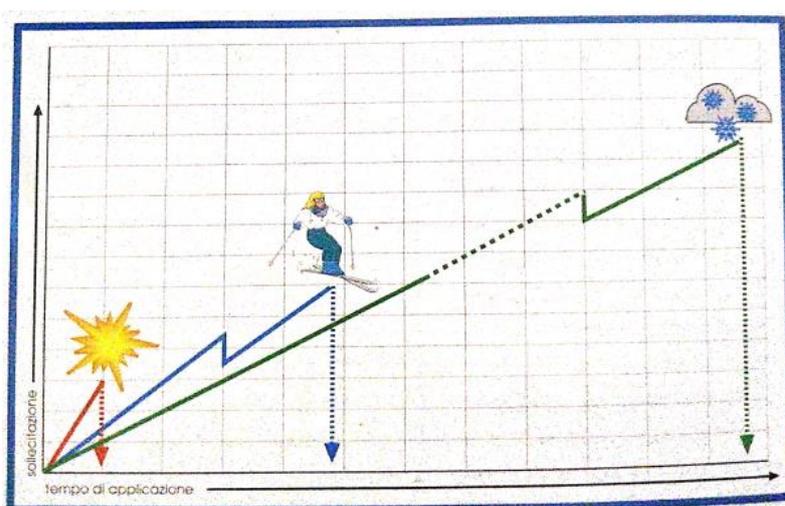


Figura 4.6- Comportamento del manto nevoso in funzione della tempo di applicazione della sollecitazione
Fonte: “Cresta R.-2002”

4.1.4 Stato tensionale all'interno del manto nevoso

La neve, adagiata lungo i pendii, tende a scorrere lungo il versante a causa dell'inclinazione dello stesso. E' di facile intuizione capire come la neve stessa, tenda a scorrere molto più velocemente tanto più l'acclività del pendio sia pronunciata.

Lungo lo sviluppo di un pendio, difficilmente di forma regolare e rettilineo, si incontrano delle irregolarità del profilo le quali possono essere classificate come zone a profilo convesso e zone a profilo concavo.

All'interno di **Figura 4.7**, è possibile notare come all'interno delle zone a profilo convesso, il manto nevoso risulti essere sollecitato alla trazione, al contrario, all'interno delle zone a profilo concavo, il manto nevoso risulta essere sollecitato a compressione.

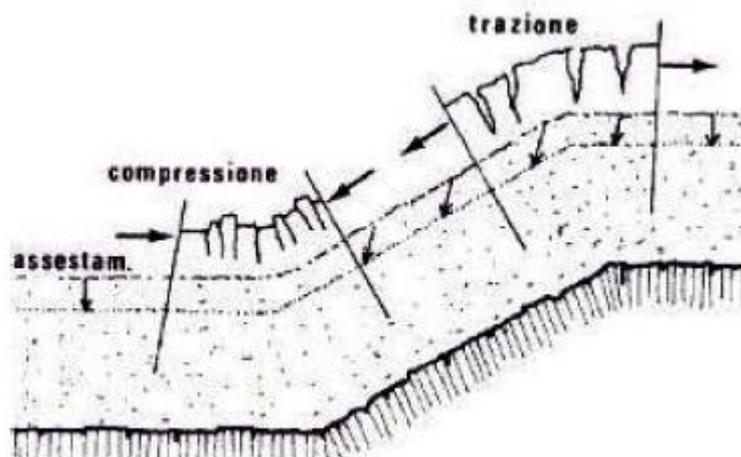


Figura 4.7- Sollecitazioni in funzione del profilo del pendio

In zone convesse, all'interno delle quali la neve è tirata verso il basso per effetto del peso proprio, è possibile osservare cedimenti o tagli più pronunciati a dimostrazione del fatto che le velocità di scorrimento, lungo il pendio, non sono uguali ma dipendono dall'acclività dello stesso e dalla massa nevosa interessata.

Oltre al profilo del pendio, è indispensabile valutare la quota parte di resistenza offerta dagli ancoraggi laterali e di fondo del lastrone di neve. Può capitare infatti che nonostante la rottura interessi tutta la zona in tensione del manto nevoso ed il cedimento dello strato più fragile, non si inneschi la valanga a causa della resistenza offerta dagli ancoraggi e dalla neve a valle.

4.2 Modello “Shear lag” applicato all'innescò delle valanghe a lastroni

Di seguito viene descritto un modello meccanico per l'innescò, sia spontaneo che artificiale, per le valanghe di neve. Tale modello può essere utilizzato come strumento di previsione del distacco o come base di dimensionamento e progettazione di un eventuale distacco artificiale tramite esplosivo.

La descrizione del modello verrà effettuata innanzitutto, partendo dalle modalità di innescò spontaneo delle valanghe a lastroni tramite l'esposizione del modello “Shear Lag”, e, a seguito della descrizione della modalità di azione delle onde d'urto all'interno del manto nevoso, verrà esposta l'applicazione del modello al distacco artificiale.

Come evidenziato all'interno del primo capitolo, il manto nevoso subisce una serie di mutazioni, dovute a processi di accumulo, compattazione e trasporto eolico, che ne causano una sostanziale modifica delle caratteristiche fisiche e meccaniche.



Il manto nevoso infine, è costituito da diversi strati che possono differire tra di loro per spessore, durezza, proprietà meccaniche, compattazione e microstruttura dei cristalli di neve che lo compongono.

Per questo motivo, ciascuno strato, è caratterizzato da differenti proprietà meccaniche che ne consentono una diversificazione dello stato tensionale all'interno di essi, che dipende dalla genesi dello strato stesso e dal successivo fenomeno di metamorfismo che andrà a modificarne le caratteristiche.

In genere, le valanghe a lastroni, sono tipiche di quei manti nevosi caratterizzati dalla presenza di un sottile strato del manto più debole, definito come weak layer, il quale si origina sotto particolari condizioni ambientali.

Il weak layer è costituito da macrocristalli che ne conferiscono scarse proprietà meccaniche in confronto a quelle degli strati sovrastanti.

La conformazione del manto nevoso, possibile sede di una valanga a lastroni, può quindi essere rappresentata attraverso i seguenti punti caratteristici, partendo dal fondo del manto nevoso:

- Strato coesivo sottostante il weak layer, ovvero il basamento dello strato debole, che può essere rappresentato dalla superficie del pendio stesso, o dalla discontinuità rappresentata dalla superficie di uno strato nevoso con caratteristiche meccaniche migliori con elevata densità.
- Strato debole, o weak layer di un certo spessore, con caratteristiche meccaniche scadenti e peggiori rispetto al basamento ed al lastrone sovrastante
- Lastrone di neve, che rappresenta lo spessore di neve in grado di essere mobilitato verso valle, nel momento in cui avviene l'innescio

4.2.1 Stabilità del manto nevoso

La stabilità del manto nevoso viene studiata partendo dalla definizione dello sforzo di taglio che agisce all'interno dello strato debole, definito dalla seguente equazione 4.1.

$$\tau_N = \gamma H \text{Sen } \alpha \quad (4.1)$$



In cui:

- γ è la massa volumica della neve
- H è l'altezza del lastrone
- α è l'inclinazione del pendio

Il prodotto definisce quindi la tensione nominale che agisce direttamente sul weak layer, nel caso in cui all'interno di esso sia esclusa la presenza di difetti preesistenti.

Nel momento in cui, come spesso accade, lo strato debole risultasse essere sede di difetti preesistenti, si identifica una porzione dello strato debole denotandolo come “super weak layer”, all'interno del quale si concentrano tutti gli sforzi.

La presenza di una super weak zone, fa sì che la tensione tangenziale massima agente possa essere anche superiore alla tensione nominale descritta in precedenza all'interno dell'equazione 4.1.

La presenza del difetto basale, all'interno dello strato debole, potrebbe causare l'innesco del meccanismo di rottura a seguito ad esempio, di nuove nevicate, dal passaggio di sciatori o al decadimento delle proprietà meccaniche della neve stessa.

La rottura, in seguito all'innesco, si propaga rapidamente all'interno del manto nevoso; la propagazione di tale rottura può avvenire secondo tre diverse modalità, come elencate in seguito:

- Modo I: apertura generata a seguito della fessurazione del manto nevoso
- Modo II: scivolamento nel piano
- Modo III: per strappo dello strato debole sottostante il lastrone

4.2.2 Distacco spontaneo

Come evidenziato in precedenza, la presenza di un difetto basale all'interno del weak layer, comporta un incremento della concentrazione degli sforzi. Per valutare tale incremento, è possibile utilizzare un criterio di rottura accoppiato tensionale/energetico, per la valutazione del campo tensionale all'interno del manto nevoso, fondato sulla teoria dei modelli shear lag applicati in genere ai materiali compositi.

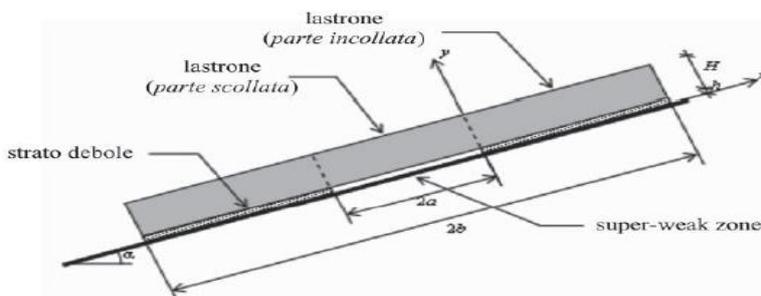


Figura 4.8- Schematizzazione del lastrone di neve
 Fonte: “Cardu M. et al-2007”

All’interno della **Figura 4.8**, è riportata la schematizzazione del lastrone di neve, il basamento costituito dal weak layer, parte incollata, ed il difetto interno ad esso che identifica la presenza della super weak zone, parte scollata. E’ importante notare la posizione del sistema di riferimento Cartesiano (x,y), con origine in corrispondenza dell’inizio della super weak zone, con l’asse delle ascisse orientato verso l’apice del lastrone.

A questo punto, partendo dalla considerazione per la quale il modulo di Young E del weak layer, risulta essere di molto inferiore rispetto a quello del manto nevoso sovrastante, è possibile fare un’assunzione, che consiste nel considerare le deformazioni al taglio, concentrate all’interno del weak layer.

Ciò implica che, il lastrone, sarebbe soggetto esclusivamente a dilatazione lungo l’asse delle x, parallelo alla direzione del pendio, nel caso in cui fossero presenti difetti interni allo strato debole (super weak zone).

Assumendo valido il principio di conservazione delle sezioni piane e definendo con a , la semi-lunghezza del difetto basale e con b la distanza dal centro della super weak zone all’apice del lastrone, è possibile valutare lo spostamento $u(x)$ di una generica sezione piana del lastrone, che grazie alle assunzioni fatte in precedenza risulta essere indipendente da y .

Considerando la grandezza $b \gg a$, e considerando la condizione di deformazioni in campo elastico-lineare, è possibile scrivere l’equilibrio del generico concio infinitesimo all’interno del lastrone attraverso la seguente relazione 4.2:

$$\tau = \frac{dN}{dx} - \gamma H s \sin \alpha \quad (4.2)$$



In cui τ è la tensione tangenziale all'interno dello strato debole ed N è la forza assiale per unità di spessore del lastrone di neve.

In assenza di difetti basali, e quindi della super weak zone, lo spostamento u lungo la direzione parallela al pendio, sarebbe nullo, comportando $N = 0$, e τ pari, in valore assoluto a τ_N , ovvero alla tensione nominale agente sullo strato debole.

Nel caso in cui il difetto fosse presente, con una super weak zone di lunghezza pari a $2a$, il lastrone risulterebbe in trazione nella parte superiore ed in compressione nella sua parte inferiore, rispetto alla posizione del difetto basale.

Considerando solo la parte superiore del manto nevoso e quindi per $x > -a$, è possibile trovare due soluzioni distinte:

- All'interno della parte scollata, quindi in corrispondenza del difetto basale, (per $-a < x < 0$), lo strato debole non è in grado di trasmettere alcuna tensione, di conseguenza, lungo questo tratto, si ha:

$$\tau = 0$$

e considerando la relazione 4.2, si ottiene:

$$N = \gamma H \sin \alpha (x + a), \quad \text{per} \quad -a < x < 0 \quad (4.3)$$

da cui si evince che, per simmetria, al centro del difetto basale si ha $N = 0$.

- In corrispondenza della parte incollata (per $0 < x < b - a$), considerando l'equazione (4.2), e definendo la grandezza:

$$\psi = \sqrt{\frac{E' H h}{G_w}} \quad (4.4)$$

In cui, i termini che definiscono il parametro precedente sono:

- E' modulo elastico dello strato debole valutato come $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$
- G_w , modulo tangenziale dello strato debole



- H , altezza del lastrone
- h , spessore weak layer

Si ottiene un'equazione differenziale degli spostamenti, espressa nella seguente equazione (4.5).

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{u}{\psi^2} = \frac{\gamma \operatorname{sen} \alpha}{E'} \quad \text{per} \quad 0 < x < b - a \quad (4.5)$$

Che fornisce la seguente soluzione generale:

$$u(x) = c_1 e^{x/\psi} + c_2 e^{-x/\psi} - \frac{\psi^2 \gamma \operatorname{sen} \alpha}{E'} \quad (4.6)$$

A questo punto imponendo le condizioni al contorno, nello specifico:

- $N = \tau_N a$ per $x = 0$, in corrispondenza del limite superiore della super weak zone
- $N = 0$ per $x = b - a$, in corrispondenza del bordo superiore del lastrone

Si ottiene la soluzione riportata nella seguente equazione (4.7).

$$u(x) = -\frac{\psi^2 \gamma \operatorname{sen} \alpha}{E'} \left(1 + \frac{a}{\psi} e^{-x/\psi} \right) \quad 0 < x < b - a \quad (4.7)$$

Infine, dall'equazione che esprime il campo tensionale in funzione degli spostamenti, è possibile valutare gli andamenti della tensione tangenziale all'interno dello strato debole, e la forza assiale all'interno del lastrone, rispettivamente indicate nelle seguenti equazioni 4.8 e 4.9:

$$\tau(x) = -\tau_N \left(1 + \frac{a}{\psi} e^{-x/\psi} \right) \quad \text{per} \quad 0 < x < b - a \quad (4.8)$$

$$N(x) = (\tau_N a) e^{-x/\psi} \quad \text{per} \quad 0 < x < b - a \quad (4.9)$$



Dalle equazioni precedenti è possibile capire quale sia l'effetto della presenza della super weak zone.

La presenza di questi difetti, all'interno dello strato debole, induce una concentrazione della tensione tangenziale all'interno della weak zone stessa, e, nello stesso momento, anche una forza assiale nel lastrone.

E' immediato valutare come la tensione tangenziale tendi alla tensione nominale, quindi al suo valore asintotico, man mano che si ci sposta verso il limite superiore del lastrone, e, conseguentemente, si ha nella stessa direzione una progressiva diminuzione della forza assiale che tende a zero.

4.2.3 Criterio di innesco tensionale

Con questo criterio, si assume che la rottura ha luogo e si propaga all'interno dello strato debole, nel momento in cui, la tensione tangenziale raggiunge un valore critico, il quale corrisponde al valore della resistenza al taglio del weak layer.

Il valore massimo della tensione tangenziale è verificato al limite superiore del difetto, per cui si esprime il criterio di rottura tensionale per l'innesco spontaneo come:

$$\tau_{max} = \tau_N \left(1 + \frac{a}{\psi} \right) = \tau_p \quad (4.10)$$

Da cui è possibile ricavare la tensione nominale alla rottura:

$$\tau_{N.s} = \frac{\tau_p}{1 + \frac{a}{\psi}} \quad (4.11)$$

L'equazione precedente dimostra come la tensione nominale alla rottura, nel caso in cui non fosse presente un difetto all'interno dello strato debole, sarebbe correttamente fornita dalla semplice τ_p .

Nel caso in cui tale difetto fosse presente, si avrebbe una drastica diminuzione della tensione nominale critica stessa.



4.2.4 Criterio di innesco energetico

Il criterio energetico, individua la condizione necessaria alla propagazione della rottura con il raggiungimento da parte della crack driving force, dell'energia di frattura di modo II.

$$G_{II} = \frac{d\varphi}{a} = G_{IIc} \quad (4.12)$$

In cui:

- φ , è il valore dell'energia di deformazione relativo all'intero manto nevoso
- G_{II} , è la crack driving force
- G_{IIc} , è il valore critico dell'energia di frattura di modo II

φ , è relativo all'intero manto nevoso, il suo valore può essere valutato, tenendo conto della validità del principio di sovrapposizione degli effetti, come la somma delle varie energie di deformazione, rispettivamente:

- φ_0 , relativa alla super weak zone (trascurabile)
- φ_1 , relativa alla parte scollata del lastrone
- φ_2 , relativa alla parte incollata
- φ_3 , relativa allo strato debole

L'espressione della crack driving force, è perciò definita:

$$G_{II} = \frac{d\varphi}{a} = \frac{\tau_N^2}{2E'H} (a^2 + 2a\psi + \psi^2) \quad (4.13)$$

In cui i contributi delle varie energie di deformazione, sono individuati dai tre addendi tra parentesi rispettivamente per la parte scollata, la zona intatta dello strato debole e del lastrone e del solo lastrone di neve scollato.

Considerando a questo punto, l'equazione 3.13, l'innesco avviene se:

$$G_{II} = \frac{d\varphi}{a} = \frac{\tau_N^2}{2E'H} (a^2 + 2a\psi + \psi^2) = G_{IIc} \quad (4.14)$$

Da cui è ricavabile l'espressione della tensione nominale critica:



$$\tau_{N,e} = \frac{\sqrt{2 E' H G_{IIc}}}{a + \psi} \quad (4.15)$$

4.2.5 Criterio di innesco accoppiato

Entrambi i criteri evidenziano come la tensione nominale di rottura dipenda dal parametro a , oltre che dalla lunghezza caratteristica del modello ψ , confermando l'effetto della super weak zone, che si traduce in un drastico decremento della resistenza.

Il criterio di innesco accoppiato si basa sulla considerazione per la quale debbano essere verificate entrambe e contemporaneamente le equazioni espresse dalla 4.11 e dalla 4.15.

Da ciò si evince che ciascun criterio, preso singolarmente, rappresenta una condizione necessaria, mentre il contemporaneo soddisfacimento dei due criteri, rappresenta una condizione sufficiente alla propagazione della rottura.

$$\tau_N > \max\{\tau_{N,s}, \tau_{N,e}\} \quad (4.16)$$

In particolare si può affermare che la propagazione della frattura avviene nel momento in cui oltre all'azione dell'energia di deformazione critica, si verifichi anche un contemporaneo campo tensionale idoneo e sufficientemente alto.

A questo punto risulta utile valutare quale dei due criteri prevalga sull'altro, per definire si può considerare che:

- Il criterio di rottura è governato dalla richiesta energetica, nel momento in cui

$$\tau_{N,e} > \tau_{N,s} \rightarrow \frac{2 G_W G_{IIc}}{\tau_p^2 h} < 1 \quad (4.17)$$

- Il criterio di rottura è governato dalla richiesta tensionale, nel momento in cui:

$$\tau_{N,s} > \tau_{N,e} \rightarrow \frac{2 G_W G_{IIc}}{\tau_p^2 h} > 1 \quad (4.18)$$

Per confronto si riporta il modello di McClung, che identifica la tensione nominale alla rottura con:

$$\tau_{N,Mc} = \frac{\sqrt{2 E' H G_{IIc}}}{a} \quad (4.19)$$

Si nota che, quanto più a risulti maggiore rispetto a ψ , tanto più i modelli coincidono. Considerando però, che le valanghe si innescano a causa della presenza della super weak zone, non è possibile trascurare, nel caso in esame, il contributo di ψ .

4.2.6 Applicazioni dei criteri di rottura

Quanto evidenziato dai paragrafi precedenti, è possibile osservarlo all'interno dei seguenti grafici di **Figura 4.9**, **Figura 4.10** e **Figura 4.11**, in cui sono riportati i valori della tensione nominale (Equazione 3.2) ed i valori critici derivanti dalle equazioni, precedentemente esposte, relative ai criteri di innesco tensionale, energetico e di McClung. Gli andamenti delle curve rappresentate, sono ottenute per i valori tipici riscontrabili in letteratura dei parametri caratteristici del manto nevoso, relativi alle proprietà fisico-meccaniche e geometriche del lastrone di neve e del materiale caratteristico del weak layer.

I grafici mostrano gli andamenti in funzione delle seguenti grandezze:

- H , altezza del lastrone in metri
- a , semi lunghezza della super weak zone in metri
- h , spessore del weak layer

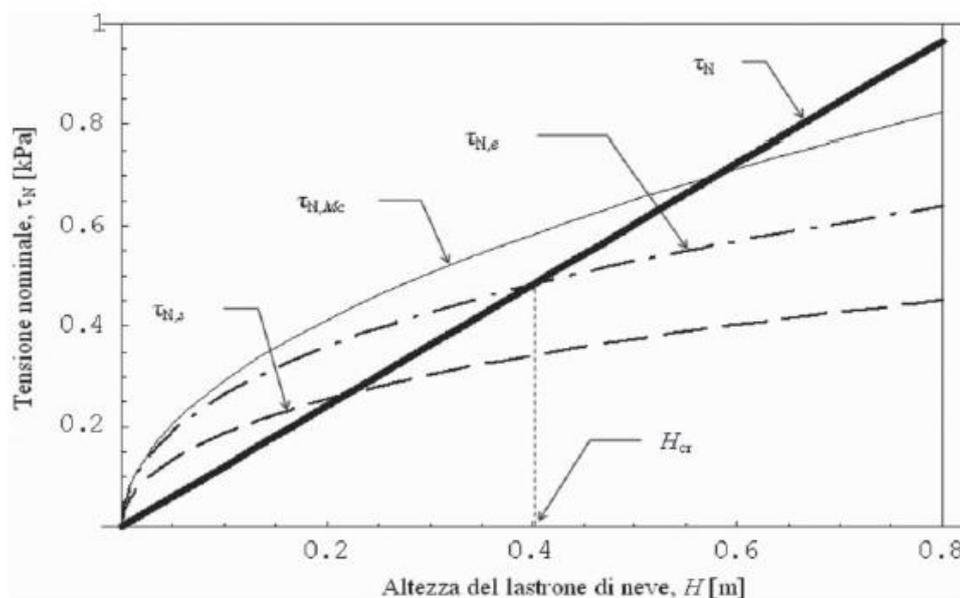


Figura 4.9- Tensione tangenziale nominale rispetto all'altezza del lastrone di neve H

Fonte: “Cardu M. et al-2007”

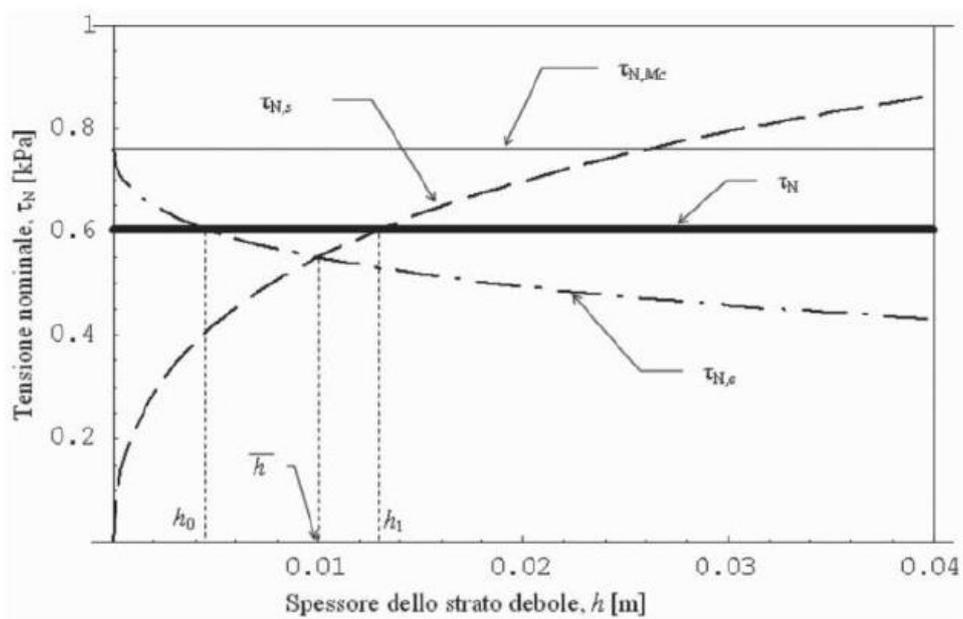


Figura 4.10- Tensione tangenziale nominale rispetto lo spessore dello strato di neve h
 Fonte: “Cardu M. et al-2007”

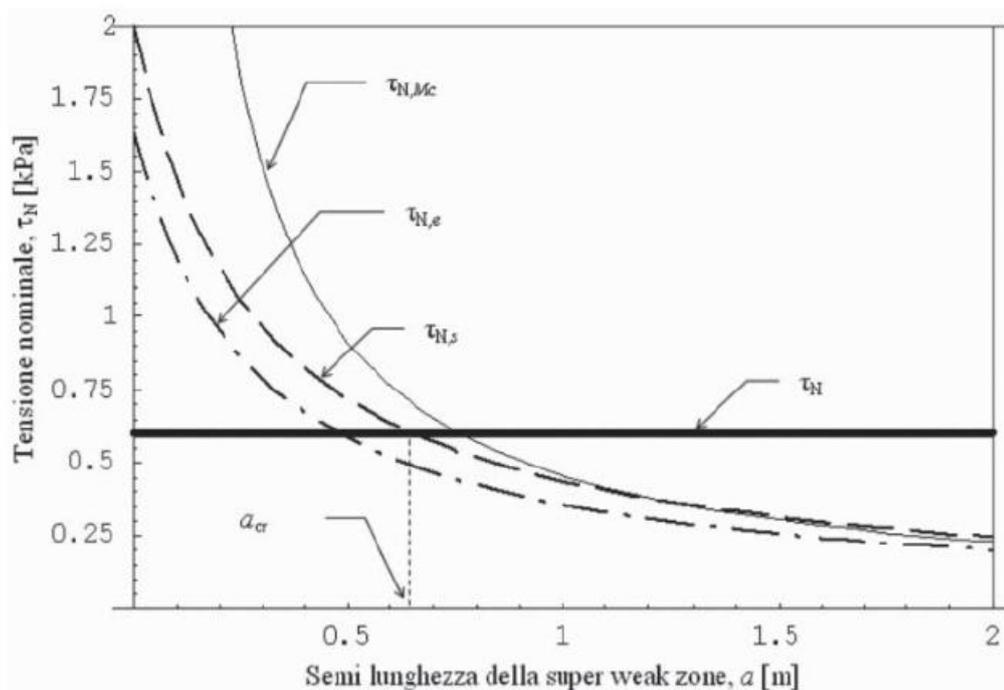


Figura 4.11- Tensione tangenziale nominale rispetto la semi lunghezza della super weak zone a
 Fonte: “Cardu M. et al-2007”



I grafici, riportati all'interno delle figure precedenti, evidenziano il distacco delle valanghe in funzione dei parametri geometrici precedentemente elencati e consentono di trarre le seguenti conclusioni:

- In funzione di H , si ha rottura ed innesco delle valanghe per $H \geq H_{cr}$, con prevalenza del criterio energetico
- In funzione di a , si ha distacco per $a \geq a_{cr}$, con prevalenza del criterio tensionale
- In funzione di h , il distacco si verifica per valori $h_0 \leq h \leq h_1$. Inoltre è possibile osservare che la tensione nominale minima, richiesta per l'innesco della valanga è rappresentata da un valore per il quale i due criteri, tensionale ed energetico, coincidono e tale valore è pari a:

$$\bar{h} = \frac{2G_w G_{IIc}}{\tau_p^2} \quad (4.20)$$

Che per i valori caratteristici equivale a circa $\bar{h} \approx 10 \text{ mm}$, valore tipicamente riscontrabile dalle osservazioni in sito.

4.3 Applicazione al distacco artificiale

Il modello appena descritto può essere esteso al distacco delle valanghe indotto artificialmente, tenendo in considerazione che, nel caso di utilizzo di esplosivi o di strumentazioni che permettono l'esplosione di miscele di gas, la rottura del manto nevoso ed il conseguente distacco, viene ottenuta nel campo delle sollecitazioni dinamiche e non più statiche come nei casi analizzati in precedenza.

Per estendere quindi la validità del modello nel campo delle sollecitazioni dinamiche, si rende necessaria una esaustiva conoscenza delle proprietà meccaniche e delle caratteristiche stratigrafiche del manto nevoso, procedendo preventivamente all'analisi del modello, con una prova penetrometrica equivalente alla prova NSPT utilizzata nella geotecnica classica.

Tra le informazioni che risultano essere necessarie rientrano:

- L'andamento della temperatura in funzione della profondità, utile per ottenere una prima approssimazione della conformazione dei cristalli

- La densità di ogni singolo strato, parametro essenziale per comprendere l'efficienza della trasmissione delle sollecitazioni indotte dall'esplosivo all'interno del manto nevoso

Avendo a disposizione tutte le informazioni relative al manto nevoso, è possibile studiare il fenomeno del distacco tramite il criterio tensionale ed il criterio energetico, come nel caso delle sollecitazioni statiche descritte in precedenza.

4.3.1 Criterio di innesco tensionale

Il criterio di innesco tensionale viene applicato nel caso di sollecitazione dinamica a partire dall'ipotesi per la quale, l'onda d'urto, agisce sul manto nevoso in due fasi separate e distinte.

- Fase 1: la sollecitazione passa all'interno dello strato debole, con conseguente danneggiamento dei cristalli che lo compongono, caratterizzati da una elevata fragilità.
- Fase 2: creazione di una tension crack, all'interno del manto nevoso, che isola il lastrone dal resto del manto, ciò implica che il carico del peso del lastrone stesso vada a gravare interamente sullo strato debole precedentemente danneggiato dall'esplosivo.

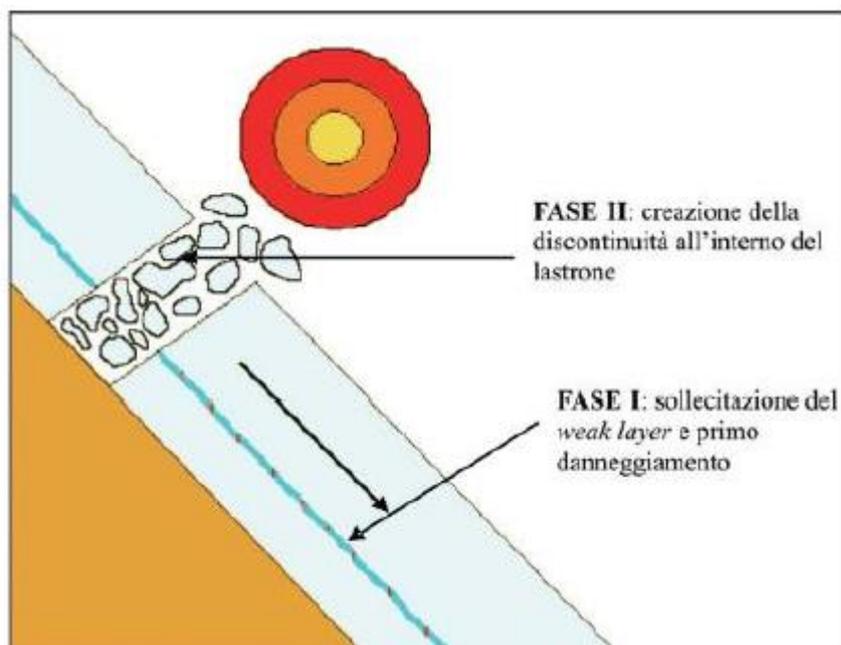


Figura 4.12- Cause che comportano il distacco della neve
Fonte: “Cardu M. et al-2007”



Da questa assunzione, ne deriva che l'effetto utile al danneggiamento dello strato debole, è dovuto alla sovrappressione indotta sulla superficie del manto nevoso dall'esplosivo.

Ciò che quindi viene analizzato è la distanza alla quale questa sollecitazione utile si propaga a partire dal punto di scoppio. Per il calcolo è possibile utilizzare una serie di formule empiriche e reperibili in letteratura, ciò permette di poter stimare, in funzione del peso della carica in TNT_{eq} , il raggio di azione della carica stessa, considerando la pressione critica, ovvero quella minima per la quale è possibile che la valanga si inneschi, pari a 30 *mb*.

4.3.2 Criterio di innesco energetico

Dal punto di vista energetico, il parametro che principalmente influenza il trasferimento della sollecitazione, indotta dall'onda d'urto, all'interno dei mezzi attraversati è rappresentato dall'impedenza acustica di ciascuno strato interessato dalla propagazione della stessa.

A partire dall'impedenza è quindi possibile valutare il rendimento di trasmissione di tale sollecitazione, calcolato come:

$$\eta = 1 - \frac{(Z' - Z'')^2}{(Z' + Z'')^2} \quad (4.21)$$

All'interno della quale Z' e Z'' rappresentano, rispettivamente, le impedenze del mezzo da cui proviene l'onda d'urto e del mezzo in cui si propaga.

Noto il rendimento è necessario conoscere l'energia specifica dell'esplosivo $\varepsilon \left[\frac{MJ}{Kg} \right]$, parametro che fornisce un'indicazione riguardo al quantitativo di energia liberata all'atto dell'esplosione, da 1 *Kg* di quel determinato esplosivo.

Non tutta l'energia emessa all'atto dell'esplosione giunge al suolo, per cui è necessario valutare l'energia utile, ovvero quella che effettivamente raggiunge il manto nevoso e verrà più o meno efficacemente propagata all'interno dello stesso.

L'energia utile che arriva sulla superficie del manto nevoso, si propaga per rifrazione all'interno dello stesso. Per valutare l'energia che viene effettivamente trasmessa all'interno della neve, è necessario moltiplicare il valore dell'energia utile, calcolata a partire dall'energia specifica, per il coefficiente di trasmissione dello strato interessato e, infine, occorre dividere per la superficie investita dall'onda d'urto. In formule:



$$\varepsilon_1^* = \varepsilon \frac{1}{A} \eta_1 \quad (4.22)$$

A questo punto per poter valutare la quota parte di energia che viene trasmessa all'interno del manto nevoso e, successivamente al substrato roccioso, è possibile svolgere analoghi calcoli a quello relativo alla formula 4.22. Per cui l'energia utile che giunge al manto nevoso viene moltiplicato per il rendimento di trasmissione all'interno della neve ed infine per lo stesso rendimento, relativo al substrato roccioso, come si evince dalle seguenti formule 4.23 e 4.24.

$$\varepsilon_2^* = \varepsilon_1^* \eta_2 \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_3^* = \varepsilon_2^* \eta_3 \quad (4.24)$$

Considerando le espressioni e la teoria descritta in precedenza, assumendo la medesima geometria, tale calcolo può essere eseguito variando la tipologia di esplosivo, in modo da poter ottenere informazioni relative all'efficienza di trasferimento energetico al variare della carica. Considerando l'espressione dell'energia di frattura, riportata all'interno della formula 4.14, relativa al criterio energetico del caso statico, l'applicazione di un carico dinamico fa sì che tale energia si abbassi grazie all'ulteriore contributo destabilizzante fornito dall'esplosivo. L'energia critica di frattura deve quindi essere riscritta tenendo conto della natura dinamica del fenomeno, per cui in formule risulta essere:

$$G_{II} = G_{IIC} - \frac{\varepsilon_2^*}{K_{din}} \quad (4.25)$$

In cui il parametro K_{din} tiene conto della dinamicità del fenomeno.

Questi fenomeni, infatti contribuiscono ad alzare di molto il valore dell'energia di frattura critica per cui per ottenere il distacco è necessaria una maggiore quantità di energia ε_2^* . Sulla base perciò di quanto fino ad ora esplicitato, il distacco si otterrà per un valore della tensione calcolabile attraverso la seguente equazione:

$$\tau_{Nrottura}^E = \frac{\sqrt{2 E H \left(G_{IIC} - \frac{\varepsilon_2^*}{K_{din}} \right)}}{a + \psi} \quad (4.26)$$



Capitolo 5. Applicazione del modello, risultati e considerazioni conclusive

5.1 Premessa

Per valutare la migliore attitudine dei diversi esplosivi citati all'interno del Capitolo 3, si è cercato di ottenere informazioni relative ai parametri che più influenzano il risultato e la corretta esecuzione della bonifica in seguito al brillamento delle cariche.

I parametri stimati per la valutazione dell'efficienza dei diversi sistemi utilizzati nel distacco artificiale di valanghe sono:

- Sovrappressione generata in seguito dell'esplosione
- Calcolo del raggio di influenza della carica
- Valutazione di trasmissione energetica all'interno del manto nevoso

I parametri appena elencati sono stati ricavati applicando il modello “Avalanche Shear Leg”, descritto all'interno del Capitolo 4 in particolare, è stata considerata la sua applicazione al distacco artificiale tenendo conto della natura dinamica del fenomeno e considerando i due diversi criteri forniti dal modello ovvero il criterio tensionale e, successivamente, quello energetico.

5.2 Sovrappressione generata dall'esplosione in funzione della distanza

Si è già definito come l'esplosione ad una certa altezza rispetto al manto nevoso assicura prestazioni migliori rispetto ad un'analogia esplosione all'interno della neve ed in superficie; per questo motivo, in accordo con la teoria relativa al modello “Avalanche Shear Leg”, si è ritenuto necessario valutare il raggio d'azione di una determinata carica tenendo conto che, la sovrappressione sufficiente per ottenere una idonea destabilizzazione del manto nevoso, è circa pari a $30 mb$, corrispondente alla pressione media, esercitata sul manto nevoso, dal passaggio di uno sciatore in traiettoria rettilinea.

In letteratura esistono molteplici formule empiriche, dovute a diversi autori, che forniscono una stima del valore di sovrappressione in funzione della distanza scalata che, come già espresso in precedenza, è pari al rapporto tra la distanza dal punto di esplosione e la radice cubica della massa dell'esplosivo espresso in kg di TNT_{eq} .



Le diverse formule hanno diversi campi di applicabilità in quanto entro determinati intervalli forniscono valori molto prossimi al valore di sovrappressione reale, perciò il calcolo è stato eseguito utilizzando le diverse formule all'interno dei campi di validità mediando i risultati all'interno di quei range in cui è possibile utilizzare più di una formula empirica.

Tra le diverse formule empiriche riscontrabili in letteratura è stata effettuata una cernita, in modo tale da poter utilizzare formule per le quali il loro campo di applicabilità e la stima dei valori di sovrappressione che forniscono, risultino essere più affidabili ai fini dell'applicazione nello specifico problema della bonifica dei versanti innevati.

Le formule utilizzate per gli scopi appena enunciati, forniscono dei valori di pressione espressi in $\frac{Kg}{cm^2}$, e risultano essere le seguenti:

Heinrich:

$$\Delta P = \frac{14,0717}{\bar{R}} + \frac{5,5397}{\bar{R}^2} - \frac{0,3572}{\bar{R}^3} + \frac{0,00625}{\bar{R}^4} \quad 0 \leq \bar{R} < 0,3 \quad (5.1 a)$$

$$\Delta P = \frac{6,1938}{\bar{R}} - \frac{0,3262}{\bar{R}^2} + \frac{2,1324}{\bar{R}^3} \quad 0,3 \leq \bar{R} < 1 \quad (5.1 b)$$

$$\Delta P = \frac{0,662}{\bar{R}} - \frac{4,05}{\bar{R}^2} + \frac{3,288}{\bar{R}^3} \quad 1 \leq \bar{R} \leq 10 \quad (5.1 c)$$

Brode:

$$\Delta P = \frac{6,7}{\bar{R}^3} + 1 \quad \Delta P > 10 \quad \frac{kg}{cm^2} \quad (5.2 a)$$

$$\Delta P = \frac{0,975}{\bar{R}} + \frac{1,455}{\bar{R}^2} - \frac{5,85}{\bar{R}^3} - 0,019 \quad 0,1 \frac{kg}{cm^2} \leq \bar{R} < 10 \frac{kg}{cm^2} \quad (5.2 b)$$

Sadowsky:

$$\Delta P = \frac{0,76}{\bar{R}} + \frac{2,55}{\bar{R}^2} + \frac{6,5}{\bar{R}^3} \quad 1 \leq \bar{R} < 15 \quad (5.3)$$

Per ottenere dei risultati confrontabili tra di loro si è valutato il raggio efficace di un'esplosione considerando la massa di esplosivo pari ad 1, 2, 3 e 5 kg, per tutti gli esplosivi



descritti all'interno del capitolo 3 e per singola esplosione per quanto riguarda il Gas.Ex e l'Avalhex, sfruttando il concetto di TNT_{eq} .

Il valore di TNT_{eq} per i diversi casi esaminati è facilmente calcolabile facendo riferimento all'energia specifica di ciascun esplosivo (reperibile all'interno delle schede tecniche dei singoli esplosivi) mentre, per il Gaz.Ex e l'Avalhex, è stato considerato un valore reperito in bibliografia.

5.2.1 Calcolo del TNT_{eq}

Il concetto di TNT_{eq} è utile nel momento in cui si vogliono paragonare gli effetti di diversi esplosivi, aventi caratteristiche differenti tra di loro, in modo da poterli riferire ad un unico esplosivo ovvero il tritolo.

Infatti il concetto di tritolo equivalente esprime il quantitativo di esplosivo necessario per ottenere gli stessi effetti che si otterrebbero dall'esplosione di un kg di tritolo.

Il valore di TNT_{eq} per i diversi esplosivi è stato ricavato partendo dalla considerazione teorica per la quale l'energia di esplosione di un grammo di TNT è pari a:

$$1160 \frac{cal}{g} = 4,853 \frac{MJ}{Kg}$$

A partire da tale valore è stato possibile valutare il coefficiente γ attraverso il quale calcolare l'equivalente in Kg di TNT, per poi poter applicare le formule empiriche riportate all'interno del paragrafo precedente, dividendo l'energia specifica del tritolo per l'energia specifica del generico esplosivo. Di seguito vengono riportati i coefficienti così ottenuti:

	En.Sp (Mj/Kg)	γ
Gomma A	6,74	1,39
Gelatina I	4,52	0,93
Tutagex 210	3,52	0,73
ANFO 5	3,8	0,78
Polvere nera	3	0,62
SNP	3,2	0,66
Premex 3300	4,24	0,87

Tabella 5.2- Indici γ utilizzati per il calcolo del TNT_{eq}



Dai valori dell'indice γ , valutato a partire dalle diverse energie specifiche degli esplosivi, si evince come, per esempio, per quanto riguarda la Gomma A, 1,39 kg di tritolo, in seguito all'esplosione, forniscono i medesimi effetti che fornirebbe 1 kg di Gomma A.

Il calcolo della sovrappressione sviluppata dall'esplosione in funzione della distanza, è stato esteso anche al sistema Gaz.Ex (per tutte le sue diverse configurazioni) ed al sistema Avalhex, considerando la massa di Tritolo Equivalente relativo ad una singola esplosione effettuata dai sistemi appena elencati.

I valori di TNT_{eq} per i suddetti sistemi, sono stati reperiti all'interno del manuale: “Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa”- Bruno et al. 2012, e sono riportati all'interno di **Tabella 5.2**.

Gazex	TNTEq (kg)
0,8 m ³	5,4
1,5 m ³	9,7
3 m ³	19,5
4,5 m ³	29,3
Avalhex	
deflagrante	3
detonante	3,5

Tabella 5.2- TNT_{eq} per GazEx e Avalhex
Fonte: “Bruno E. et al.-2012”

5.2.3 Raggio di influenza (applicazione del criterio tensionale)

Utilizzando le formule empiriche elencate in precedenza e considerando gli indici γ , calcolati come evidenziato all'interno di Tabella 5.2, si sono valutati i kg di TNT_{eq} , per i diversi esplosivi considerando le masse pari a 1,2,3 e 5 kg ed, infine, si è valutata la sovrappressione generata in seguito dell'esplosione in funzione della distanza dal punto di scoppio.

I risultati ottenuti sono delle curve di sovrappressione decrescenti all'aumentare della distanza, a titolo di esempio si riportano all'interno di **Figura 5.2** e **Figura 5.3**, le curve di sovrappressione ottenute per l'ANFO 5 e per il Gazex (per tutte le diverse configurazioni di esploditore).

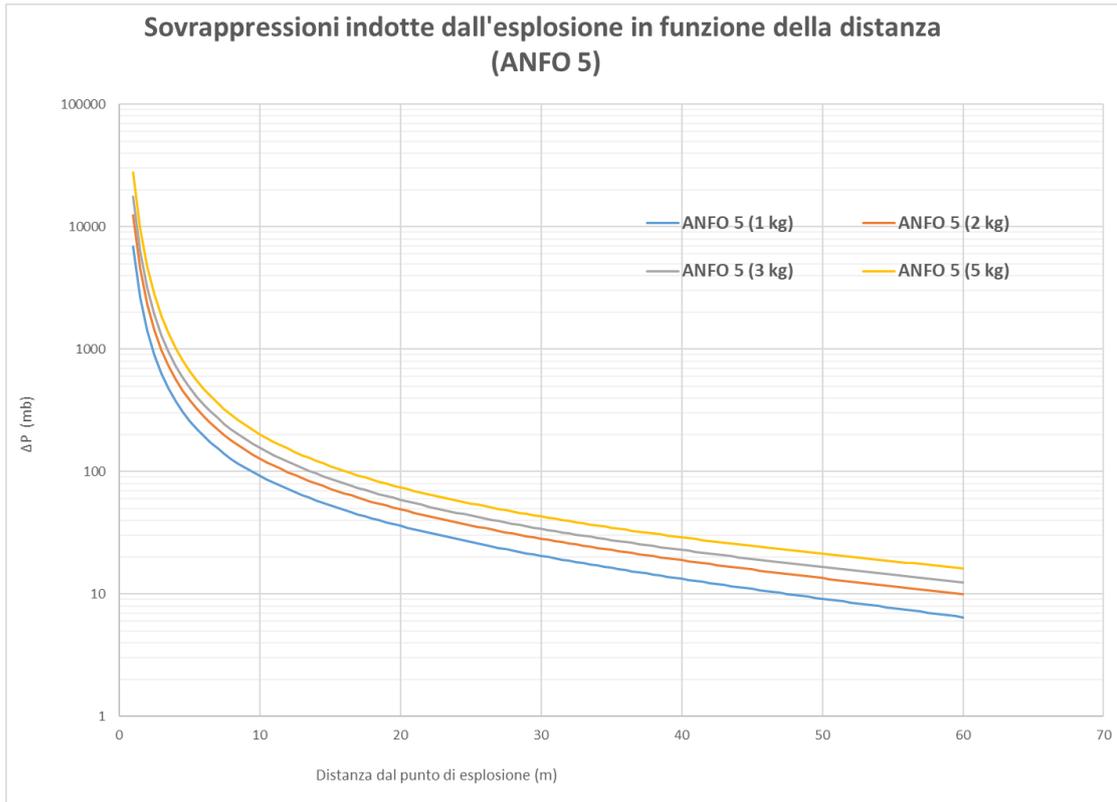


Figura 5.2- Sovrappressione in funzione della distanza (ANFO 5)

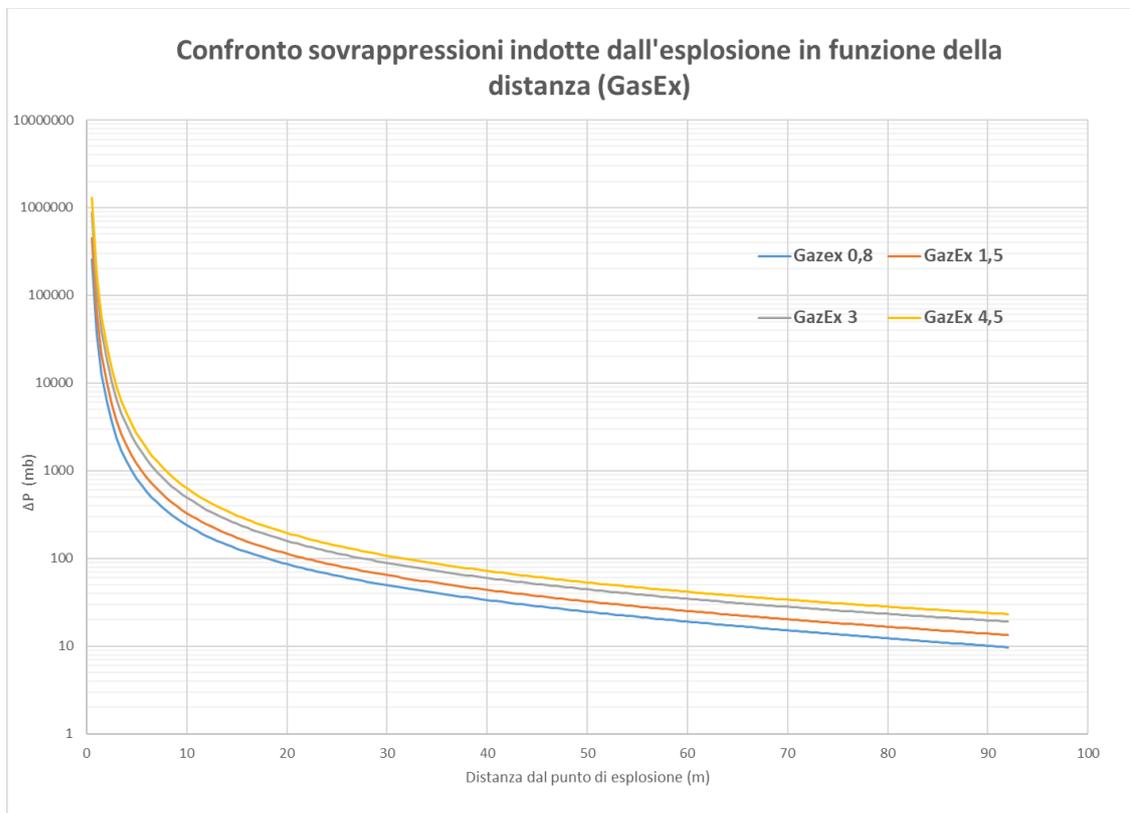


Figura 5.3- Sovrappressione in funzione della distanza (GazEx)



Per quanto riguarda il raggio di influenza, come già evidenziato in precedenza, una volta ottenuti i valori di sovrappressione in funzione della distanza, si sono ricavati i valori di quest'ultima corrispondenti ai 30 mb sufficienti per la corretta esecuzione della bonifica.

Tali risultati vengono riassunti all'interno delle seguenti: **Tabella 5.3** e **Tabella 5.4**.

Raggio di influenza (m)				
Massa Esplosivo (kg)	1 kg	2 kg	3 kg	5 kg
Gomma A	27,5	35	40	47,5
Gelatina I	24	30	35	41,5
Tutagex 210	22	28	32	38
ANFO 5	23	29	33	39,5
Polvere Nera	21	26,5	30,5	36
SNP 25	22,5	27	31	37
Premex 3300	24	29,5	33,5	40

Tabella 5.3- Raggio di influenza per i diversi esplosivi e per le diverse masse considerate

Raggio di influenza (m)				
Gazex	0,8 m ³	1,5 m ³	3 m ³	4,5 m ³
		43,5	52,5	67
Avalhex	Tiro detonante		Tiro deflagrante	
	39		36	

Tabella 5.4- Raggio di influenza per GazEx ed Avalhex per le diverse configurazioni

Dalle tabelle riassuntive si può notare come, tale differenza, non sia netta tra i diversi esplosivi soprattutto tenendo in considerazione che la massa di esplosivo utilizzata per questi scopi non risulta mai essere eccessivamente grande infatti, tali differenze, sarebbero più marcate se la massa della carica aumentasse di molto. A dimostrazione di ciò, i calcoli svolti per il sistema Gazex il quale, avendo valori di TNT_{eq} nettamente superiori, restituiscono valori del raggio efficace molto maggiori rispetto agli esplosivi convenzionali.

Di conseguenza si perviene alle seguenti considerazioni:

- Il sistema Gazex con esploditore da 0,8 m³ ed il sistema Avalhex, per entrambe le configurazioni di esplosione, forniscono risultati paragonabili all'utilizzo di una massa di esplosivo compresa tra 3 kg e 5 kg, a seconda della tipologia di esplosivo.



- Il sistema Gazex con esploditore da $1,5 m^3$, è caratterizzato da un raggio di influenza circa pari a 52,5 m, valore che con l'esplosivo si raggiungerebbe per masse comprese tra 6 kg e 8 kg.
- Il sistema Gazex con esploditore da $3 m^3$, fornisce un raggio di influenza pari a circa 67 m, valore corrispondente ad una massa di esplosivo superiore a 20 kg.
- Il sistema Gazex con esploditore da $4,5 m^3$, fornisce un raggio di influenza di circa 77 m, corrispondente ad una massa di esplosivo superiore a 30 kg.

Da tali considerazioni se ne deduce che l'utilizzo di una singola esplosione del Gazex, per pendii di estensione superiore ai 50 m è sicuramente più conveniente rispetto all'esplosivo convenzionale, viste le elevate masse necessarie ad ottenere le medesime prestazioni. L'utilizzo di masse così grandi di esplosivo comporta grandi rischi sia per gli operatori addetti al brillamento delle cariche e sia per i territori limitrofi al sito di interesse vista la probabilità relativa al distacco di masse nevose indesiderate che aumenterebbero a dismisura il volume della valanga provocata.

Il Gazex, come del resto anche l'Avalhex, ha inoltre il vantaggio di fornire un'onda d'urto perfettamente incidente e direzionata verso il manto nevoso, per questo motivo si ottengono distacchi più facilmente gestibili e prevedibili rispetto all'utilizzo dell'esplosivo.

5.3 Criterio energetico

Dall'altro punto di vista, quindi considerando la trasmissione energetica dell'onda d'urto all'interno della neve, la differenza tra i diversi esplosivi è molto più evidente.

Si è parlato di come l'esplosione in aria rappresenti il sistema più efficiente attraverso il quale ottenere il distacco del manto nevoso, ciò garantisce quindi una maggiore estensione dell'area sollecitata. Per ottenere il distacco delle masse nevose infatti, è necessario sollecitare un grande volume di neve per far sì che il distacco si estenda per tutto il pendio interessato.

Per questo motivo, per le considerazioni dal punto di vista energetico si fa in seguito riferimento ad una carica posizionata in aria con le seguenti caratteristiche:

- Carica posizionata a 2 m d'altezza, valore medio dell'altezza di posizionamento
- Carica sferica e propagazione sferica dell'onda d'urto

- Strato di neve unico ed omogeneo

Di conseguenza, l'azione dell'esplosivo sul manto nevoso può essere schematizzata come riportato all'interno della seguente **Figura 5.4**.

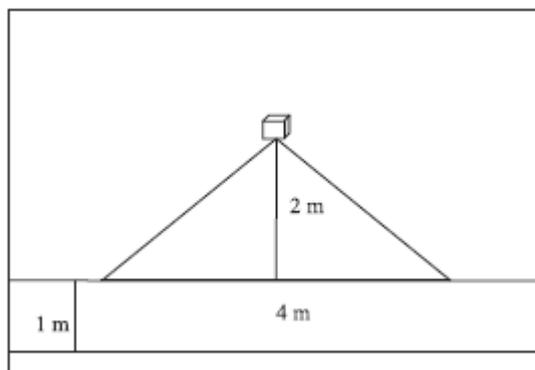


Figura 5.4- Schematizzazione della geometria della carica
Fonte: “Cardu M. et al-2007”

Facendo riferimento perciò alla densità del manto nevoso, variandola in base allo stato di metamorfismo in cui riversa, è possibile suddividere i valori di densità in tre diverse condizioni del manto nevoso.

- Neve fresca, con densità del manto nevoso variabile tra i $60 \frac{kg}{m^3}$ e i $250 \frac{kg}{m^3}$, con velocità di propagazione delle onde P variabili tra i 300 ed i $900 \frac{m}{s}$
- Neve mediamente metamorfosata, con densità compresa tra i $250 \frac{kg}{m^3}$ ed i $500 \frac{kg}{m^3}$ e velocità comprese tra 500 ed i $1700 \frac{m}{s}$
- Neve fortemente metamorfosata, con densità compresa tra i $500 \frac{kg}{m^3}$ ed i $750 \frac{kg}{m^3}$ e le rispettive velocità, comprese tra i 1700 ed i $2300 \frac{m}{s}$

Per valutare la trasmissione dell'energia all'interno del manto nevoso, bisogna tenere conto che l'energia messa a disposizione dall'esplosivo, all'atto dell'esplosione, è correttamente fornita dal valore dell'energia specifica.

Non tutta questa energia, però raggiunge il manto nevoso, per questo motivo per valutare l'attenuazione dell'onda d'urto è possibile fare alcune considerazioni geometriche, difatti, avendo considerato la propagazione dell'onda come sferica, questa si distribuisce in ugual

misura in tutte le direzioni per cui, solo un quarto dell'energia disponibile sarà correttamente direzionata verso il manto nevoso.

Inoltre è necessario valutare l'attenuazione dell'onda d'urto a causa del passaggio all'interno dell'aria circostante la carica, per valutare ciò occorre far riferimento, come evidenziato in precedenza alle impedenze acustiche dei mezzi attraversati, considerando per l'aria una densità di $1,225 \frac{kg}{m^3}$ ed una velocità delle onde P all'interno di essa pari a $330 \frac{m}{s}$.

Calcolato il valore di energia che giunge all'interfaccia tra l'aria e la neve, occorre rapportarla all'area su cui incide, che visto lo schema precedentemente riportato, sotto le ipotesi definite risulta essere pari a $16 m^2$.

Infine valutando l'efficienza di trasferimento energetico all'interno della neve, è possibile valutare la quota parte dell'energia messa a disposizione dall'esplosivo all'atto dell'esplosione, che attraversa il manto nevoso, moltiplicando il valore energetico calcolato all'interfaccia con la neve per tale rendimento, come proposto dal modello di innesco delle valanghe a lastroni per il criterio energetico.

Applicando le considerazioni appena elencate, si perviene ai seguenti risultati, riportati all'interno dei grafici di **Figura 5.5**, **Figura 5.6**, **Figura 5.7**, **Figura 5.8**, **Figura 5.9**.

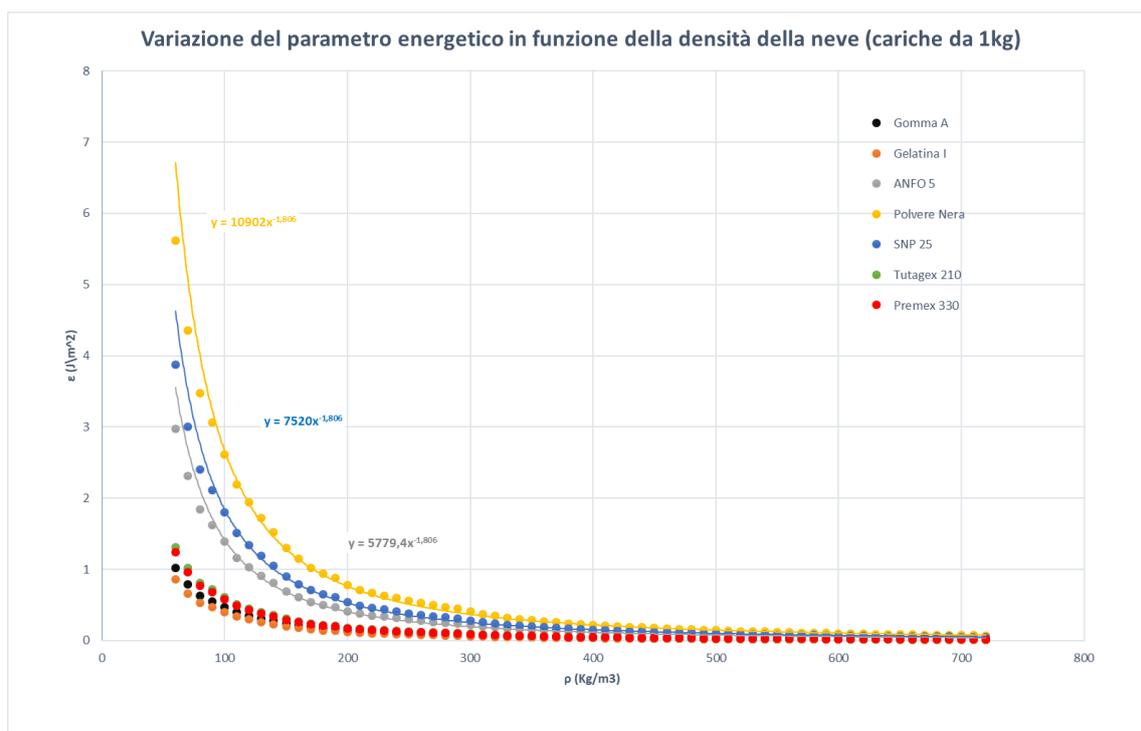


Figura 5.5- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve (1kg di esplosivo)

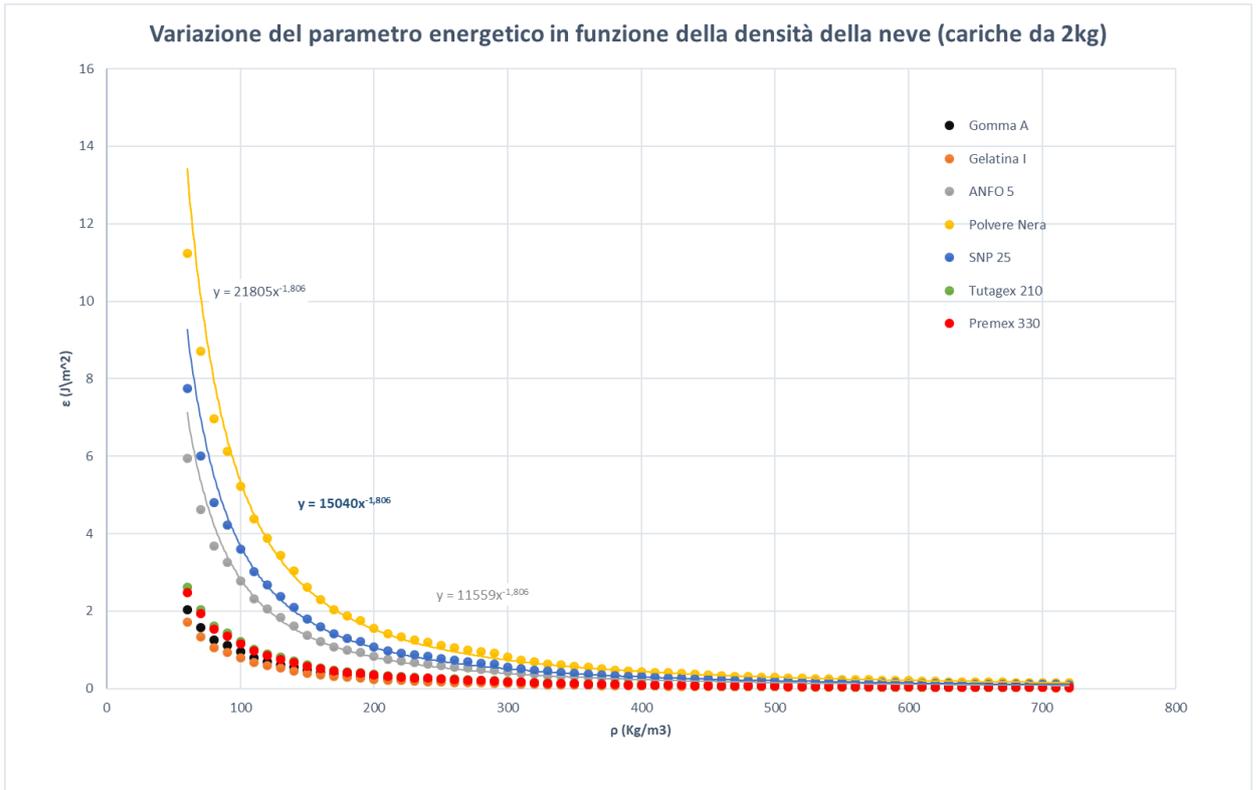


Figura 5.6- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve (2 kg di esplosivo)

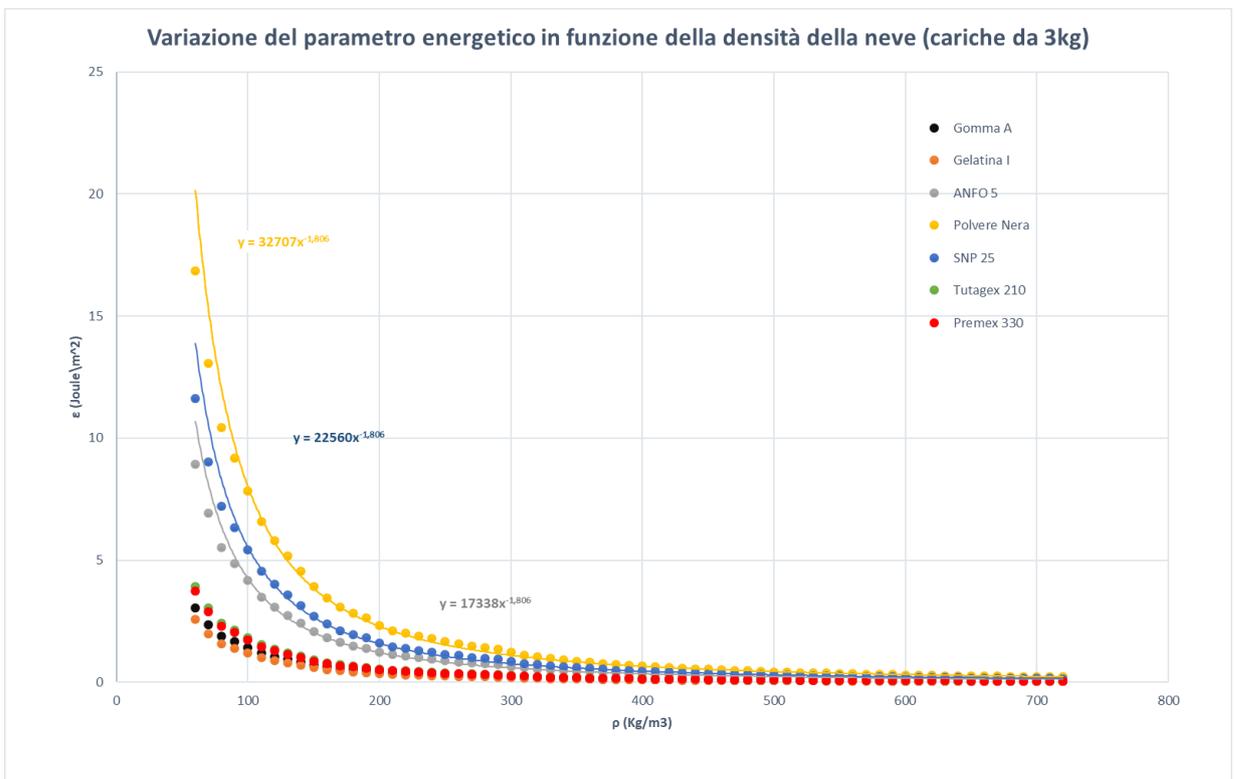


Figura 5.7- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve (3 kg di esplosivo)

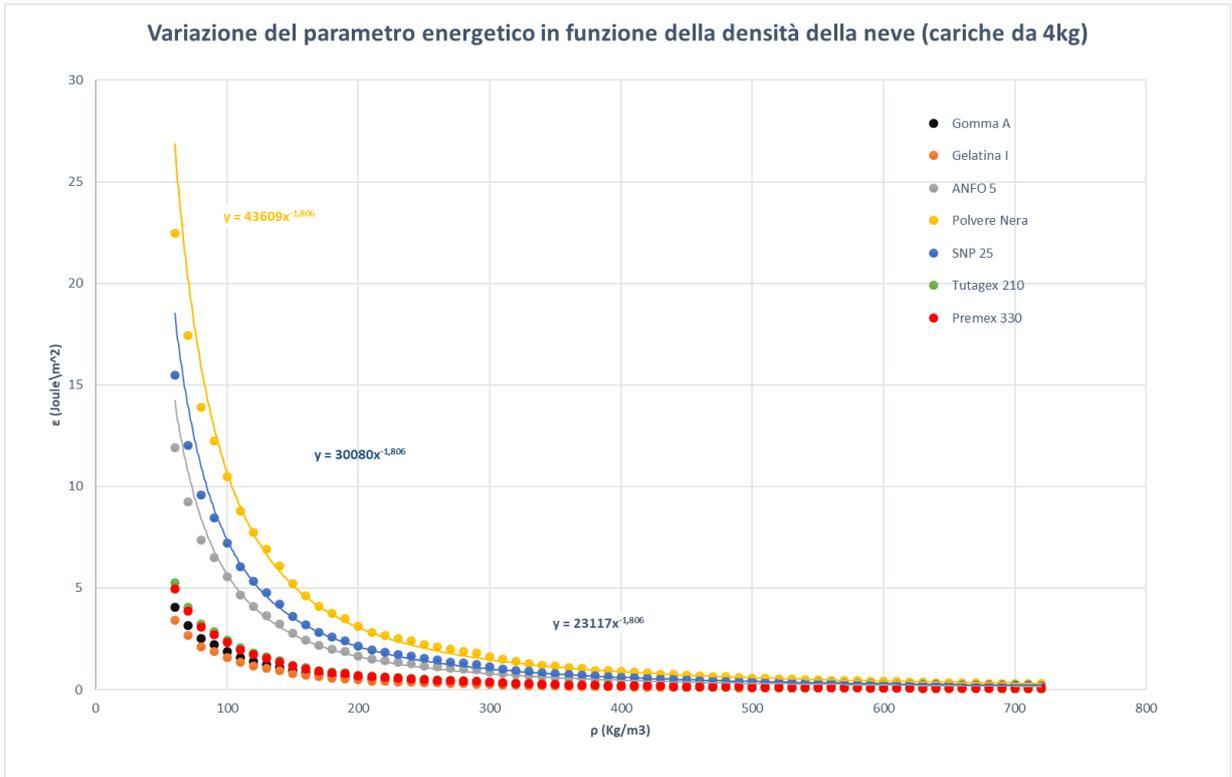


Figura 5.8- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve (4 kg di esplosivo)

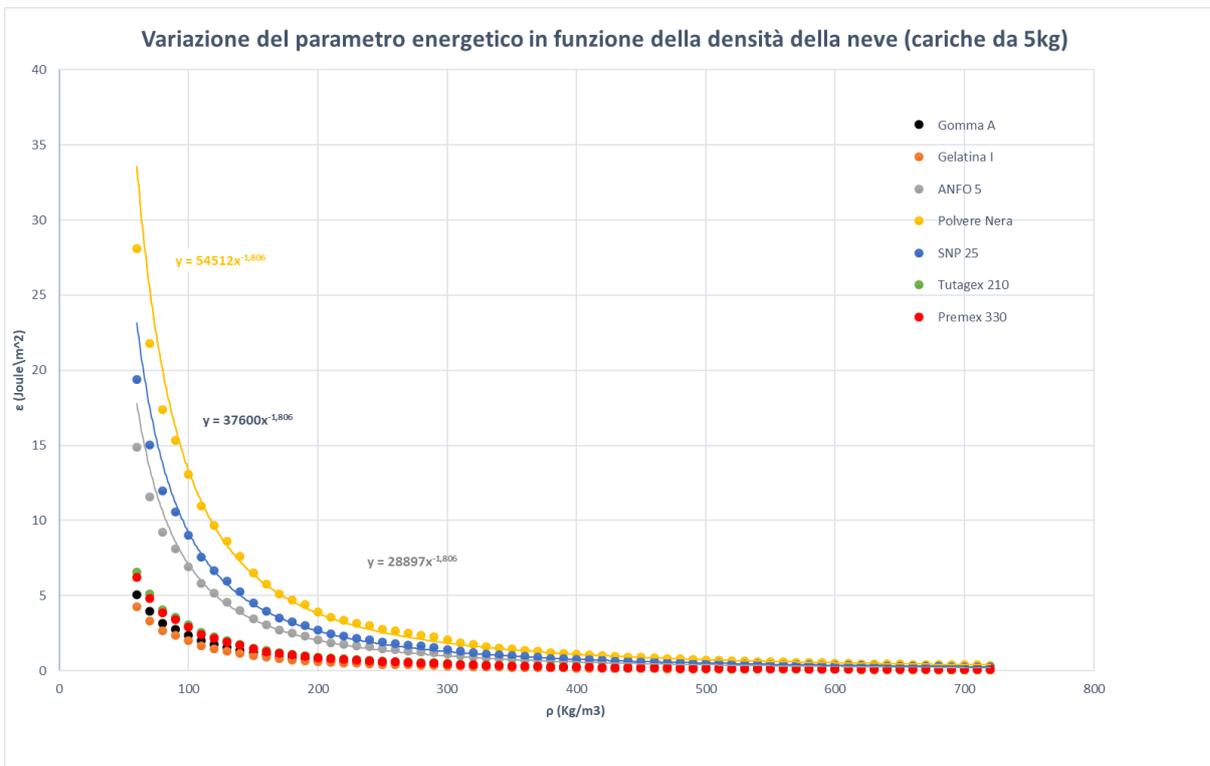


Figura 5.9- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve (5 kg di esplosivo)



Come si evince dalle figure riportate in precedenza, è netta la migliore predisposizione, per questa tipologie di bonifiche, degli esplosivi deflagranti quali la Polvere Nera, L'esplosivo della Sniper il SNP25 e l'ANFO pur essendo un esplosivo detonante.

Difatti i bassi valori di densità di questi esplosivi fanno sì che i valori di impedenza competenti a questa tipologia di esplosivi, garantiscano un migliore accoppiamento con i mezzi materiali attraversati, assicurando una più efficace sollecitazione del manto nevoso.

Applicare tali considerazioni ai sistemi fissi che sfruttano l'esplosione delle miscele di gas non risulta essere di facile realizzazione, poiché per questi sistemi non è fornito un valore di densità del gas all'atto dell'esplosione e né tanto meno un valore di energia specifica.

Si è però comunque fatto un ragionamento per pervenire ad alcune considerazioni finali che potessero mettere in relazione la loro efficienza, con gli esplosivi.

Partendo dal presupposto che i valori di TNT_{eq} , per gli esplosivi, sono ricavati a partire dalle energie specifiche competenti a ciascuno di essi, avendo a disposizione i valori di TNT_{eq} per il Gazex, è possibile, conoscendo il valore dell'energia specifica competente ad 1 kg di TNT, ricavare un valore rappresentativo dell'energia messa a disposizione, all'atto dell'esplosione dalla miscela di gas del Gazex, secondo il ragionamento che segue.

Il valore di energia specifica del TNT è pari a $4,853 \frac{MJ}{kg}$, di conseguenza conoscendo i valori di TNT_{eq} del Gazex, per tutte le tipologie di esploditore, e considerando la seguente equazione 5.4:

$$TNT_{eqGazex} = \frac{ES_{Gazex}}{ES_{TNT}} \rightarrow ES_{Gazex} = TNT_{eqGazex} \cdot ES_{TNT} \quad (5.4)$$

I valori di energia specifica risultano pari a:

Gazex	
	Es (MJ/kg)
0,8 m ³	26,21
1,5 m ³	47,07
3 m ³	94,63
4,5 m ³	142,19

Tabella 5.5- Energia specifica teorica del Gazex



Per valutare la densità del gas del sistema Gazex, si è proceduto con un calcolo simile a quello effettuato per la valutazione dei valori di TNT_{eq} , competenti a ciascun esplosivo, valutando un coefficiente adimensionale partendo dai valori dei raggi efficaci calcolati, applicando le formule empiriche riportate all’interno del capitolo precedente.

Considerando che 1 kg di TNT sviluppa una sovrappressione di 30 mb ad una distanza di 21 m, il coefficiente α è calcolato secondo la seguente logica.

$$\alpha = \frac{R_{eff\ Gazex}}{R_{eff\ TNT}} \quad (5.5)$$

Ottenendo i seguenti valori:

Gazex	
	α (-)
0,8 m ³	2,07
1,5 m ³	2,50
3 m ³	3,19
4,5 m ³	3,67

Tabella 5.6- Parametro α per il calcolo della densità equivalente

Moltiplicando tale coefficiente per la densità del tritolo e per il coefficiente α è stata valutata una densità equivalente relativa al sistema Gazex, per le diverse tipologie di esploditore, ottenendo i seguenti risultati:

Densità equivalente Gazex (Kg/m ³)
3418
4125
5264
6050

Tabella 5.7- Densità equivalenti teoriche del Gazex

L’altro parametro necessario per il calcolo dell’impedenza è la velocità di propagazione dell’onda d’urto che, secondo quanto riportato all’interno del manuale “Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa” (Bruno E. et al-2012) risulta essere pari a $600 \frac{m}{s}$, per tutte le tipologie di esploditore.

A questo punto, applicando lo stesso criterio utilizzato per la valutazione dell'energia trasmessa all'interno del manto nevoso, per gli esplosivi, si perviene ai risultati riportati in **Figura 5.10**.

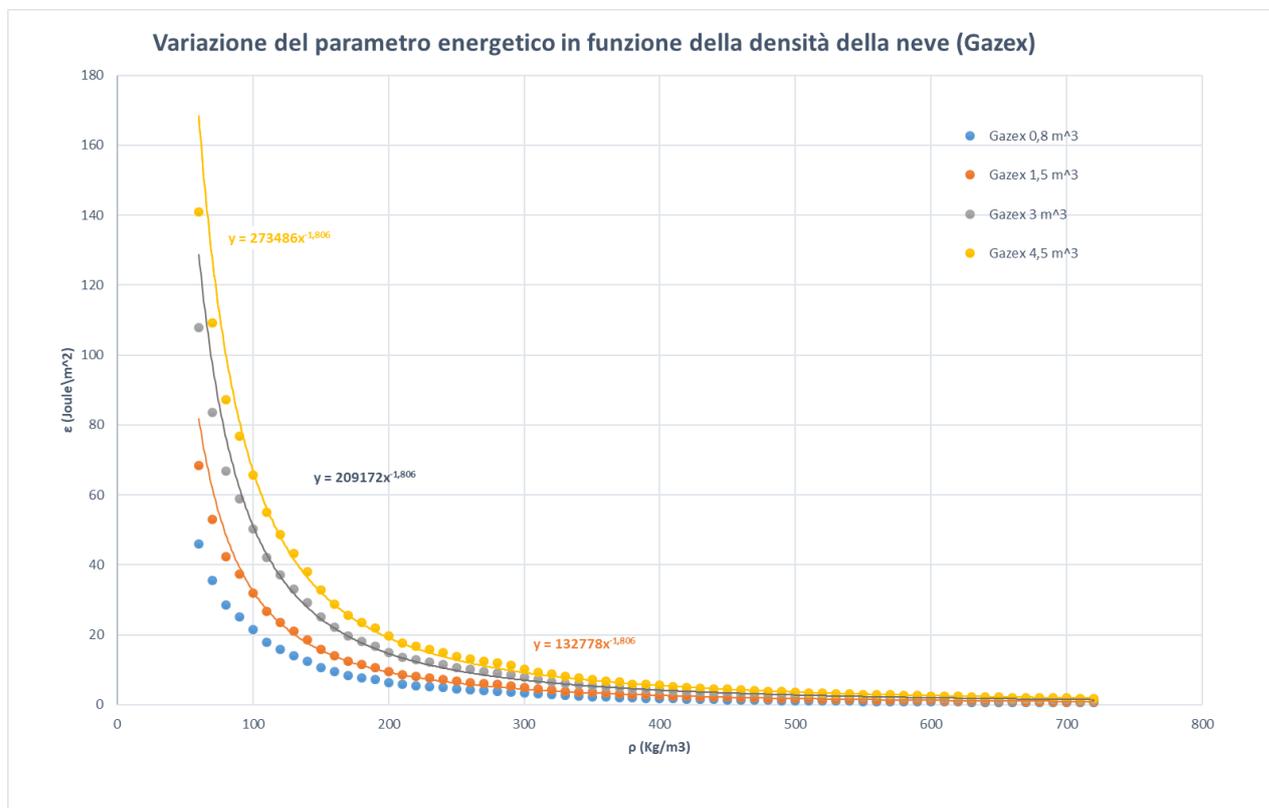


Figura 5.10- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve (Gazex per tutte le tipologie di esploditore)

Ovviamente per quanto riguarda il Gazex, la maggiore efficienza di trasmissione energetica nel manto nevoso è relativa ai sistemi con esploditori maggiori, in quanto ad essi competono valori di energia specifica molto più elevati, inoltre confrontando i valori di energia, il Gazex assicura un buon accoppiamento con il manto nevoso, questo è da imputare al fatto che, tale sistema, oltre ad offrire valori molto elevati di energia specifica, basti pensare all'elevato valore di TNT_{eq} che gli compete, investe il manto nevoso con velocità di propagazione molto più basse rispetto agli esplosivi, assicurando un'ottima sollecitazione dello stesso.

Per quanto riguarda il sistema Avalhex, si è scelto di non procedere con il medesimo approccio vista la mancanza di informazioni circa la velocità di propagazione dell'onda d'urto; si può però affermare che tale sistema restituisce prestazioni molto interessanti, alcune fonti identificano la percentuale di successo degli interventi effettuati con l'Avalhex anche al di sopra del 90 %.



Considerando sempre gli andamenti dell'energia propagata all'interno del manto nevoso, in funzione della densità, si osserva che all'aumentare della densità della neve l'effetto destabilizzante dell'esplosione diminuisce: questo è da imputare all'aumento dei valori di impedenza del manto nevoso: a causa di ciò si osserva un'attenuazione dell'energia trasmessa all'interno di essa.

E' di fondamentale importanza valutare l'energia di frattura critica posseduta dal manto nevoso: infatti, come si evince dal criterio energetico del modello di distacco delle valanghe di neve (Cardu et al. 2007), la frattura nel manto nevoso si propaga nel momento in cui la crack driving force raggiunge un valore critico.

$$G_{II} = \frac{d\varphi}{a} = \frac{\tau_N^2}{2E'H} (a^2 + 2a\psi + \psi^2) = G_{IIc} \quad (5.6)$$

Agire con l'esplosivo vuol dire indurre una diminuzione della G_{IIc} , favorendo il soddisfacimento dell'equazione 5.6; può capitare però che la bonifica del pendio non vada a buon fine.

Questo si verifica nel momento in cui la densità della neve aumenta a causa dell'attuazione delle diverse fasi di metamorfismo.

In particolare, nei casi in cui si ha metamorfismo per fusione e rigelo (nevi con una elevata umidità), oppure la formazione di cumuli di neve ventata, classico esempio dei casi in cui si vengono a formare le così dette cornici di neve o ponti di neve, il valore dell'energia critica di frattura può aumentare sensibilmente e, in genere, può raggiungere valori massimi anche superiori ai $2 \div 3 \frac{J}{m^2}$, valori riscontrabili in nevi con densità dell'ordine dei $200 \div 300 \frac{kg}{m^3}$.

Per questo motivo, in fase di pianificazione di intervento, è necessario stabilire la quantità di esplosivo da utilizzare tenendo conto sia dell'estensione della superficie da bonificare, sia delle condizioni del manto nevoso.

Per quanto riguarda l'estensione dell'area da bonificare, è possibile ricavare un ordine di grandezza del raggio efficace dell'esplosione, valutando la distanza alla quale è plausibile che si abbia una sovrappressione di almeno 30 mb.



Per le condizioni del manto nevoso, osservando gli andamenti delle curve si propongono alcune equazioni che forniscono un valore teorico di energia trasmessa all'interno del manto nevoso, per unità di superficie.

Tali equazioni sono ricavate per interpolazione dei punti calcolati facendo variare la densità della neve e la velocità di propagazione delle onde P, e possono essere scritte come riportato all'interno della relazione 5.7:

$$\varepsilon = a \rho^{-b} \quad (5.7)$$

In cui:

- ρ , è la densità della neve espressa in $\frac{kg}{m^3}$
- a e b , sono dei coefficienti che tengono conto rispettivamente delle caratteristiche dell'esplosivo e delle caratteristiche meccaniche del manto nevoso.
- ε è il valore di energia trasmessa teorico, espresso in $\frac{J}{m^2 kg}$, essendo ricavata per un singolo kg di sostanza esplosiva

Considerando il grafico di Figura 5.5, relativo ad un kg di sostanza esplosiva, le equazioni che forniscono il valore di energia trasmessa all'interno del manto nevoso, risultano essere le seguenti (Equazioni 5.8 a ÷ g):

- **Polvere Nera**

$$\varepsilon = 10902 \rho^{-1,806} \quad (5.8 a)$$

- **SNP 25**

$$\varepsilon = 7520 \rho^{-1,806} \quad (5.8 b)$$

- **ANFO 5**

$$\varepsilon = 5779,4 \rho^{-1,806} \quad (5.8 c)$$

- **Gazex 0,8 m³**

$$\varepsilon = 89205 \rho^{-1,806} \quad (5.8 d)$$



- **Gazex 1,5 m³**

$$\varepsilon = 132778 \rho^{-1,806} \quad (5.8 e)$$

- **Gazex 3 m³**

$$\varepsilon = 209172 \rho^{-1,806} \quad (5.8 f)$$

- **Gazex 4,5 m³**

$$\varepsilon = 273486 \rho^{-1,806} \quad (5.8 g)$$

Gli esplosivi deflagranti, già per piccole cariche restituiscono valori di energia trasmessa all'interno del manto nevoso molto più elevate rispetto agli esplosivi detonanti, analogamente al Gazex, che, grazie al suo elevato contenuto energetico, nel momento dell'esplosione garantisce, anche per densità maggiori del manto nevoso, un discreto valore di energia trasmessa nella neve.

Quindi se ne deduce che gli esplosivi, per aumentare la probabilità di innesco della valanga, necessitano di una pianificazione di intervento più tempestiva; è infatti molto più probabile che si ottenga una bonifica eseguita con successo per nevi fresche e con densità non superiori a $150\backslash 200 \frac{kg}{m^3}$. Alcuni studiosi concordano nell'individuare il periodo compreso all'interno delle tre ore successive alla precipitazione nevosa, il momento più opportuno in cui intervenire.

C'è da tenere in considerazione però che tale intervallo di tempo è molto ristretto, inoltre l'intervento con l'esplosivo, a prescindere dalla tipologia di sistema di piazzamento delle cariche utilizzato, non è sempre perseguibile, vista la difficoltà in caso di vento forte di poter intervenire con elicotteri o droni, o difficoltà di accesso al sito di interesse nel caso di particolari condizioni di pericolo del personale addetto alla bonifica, come nel caso di lancio a mano o per scivolata.

I sistemi fissi quindi, da questo punto di vista, garantiscono una maggiore flessibilità di utilizzo, visto che, essendo comandati da remoto, sono in grado di poter intervenire a prescindere dalle condizioni meteo-climatiche, di contro però, soprattutto per quanto



riguarda il Gazex, sono caratterizzati da un notevole impatto paesaggistico, visto che la loro struttura è completamente in antitesi con il paesaggio montano.

5.3.1 Applicazione in neve fortemente metamorfosata (cornici e ponti di neve)

Può capitare che la bonifica debba essere eseguita per provocare il distacco di ponti di neve o di cornici di neve ventata: i primi rappresentano un grosso rischio, soprattutto per gli alpinisti, in quanto danno l'apparenza di essere una via sicura da seguire, ma occorre precisare che, un ponte di neve è un arco di accumulo nevoso che può congiungere le estremità di un crepaccio o le fessure tra le rocce.

La neve che costituisce queste particolarità del manto nevoso, è neve ventata molto densa e particolarmente resistente: in questi casi per il distacco non interessa più agire, come per le valanghe di neve, in maniera progressiva, sollecitando quanto più possibile la zona instabile della massa nevosa.

In questi casi l'intervento deve arrecare una sollecitazione alla struttura dei cristalli di neve, tale da poterne consentire la frantumazione ed il conseguente crollo della cornice o del ponte.

Per questo motivo, la tecnica utilizzata in questi casi, prevede l'inserimento delle cariche all'interno di fori, quasi come una volata progettata per gli scavi in roccia.

Considerando perciò l'applicazione del criterio energetico per i casi appena enunciati, è utile valutare la trasmissione energetica all'interno del manto nevoso, considerando cariche di esplosivo inserite al suo interno. Esistono delle relazioni empiriche proposte da diversi studiosi riguardo al dimensionamento della linea di tiro per l'abbattimento preventivo di cornici e ponti di neve.

Applicando gli stessi ragionamenti precedentemente effettuati, riguardo alle impedenze del manto nevoso e dell'esplosivo, si è ottenuto il grafico di **Figura 5.11**.

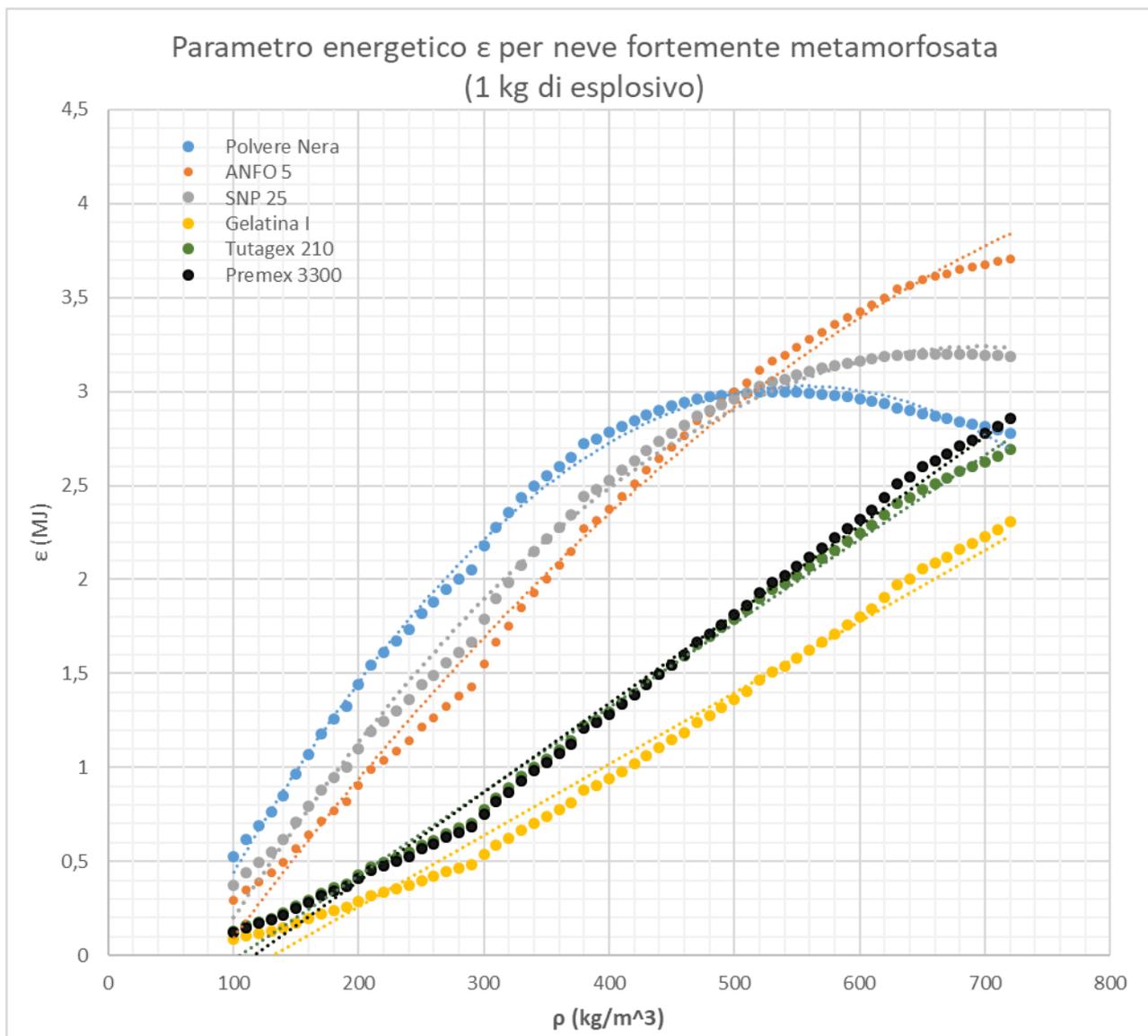


Figura 5.11- Variazione di ϵ in funzione della densità della neve per cornici e ponti di neve

Anche in questo caso, si nota come gli esplosivi deflagranti abbiano una efficienza di trasmissione all'interno del manto nevoso molto più elevata, rispetto gli esplosivi detonanti.

E' di particolare interesse il punto di intersezione tra le curve relative all'ANFO 5, alla Polvere nera ed al SNP 25, a partire dal quale gli esplosivi puramente deflagranti vengono superati in efficienza dall'ANFO 5.

Per questo motivo, si suggerisce di adottare, ai fini dell'esplosivo corretto da impiegare, considerazioni analoghe a quelle appena descritte, per l'abbattimento di cornici di neve.



5.4 Considerazioni conclusive

Si è già trattata in precedenza l'efficacia dell'esplosione in funzione del posizionamento della carica rispetto al manto nevoso, per il quale si è visto che il tiro ad una certa quota sopra la superficie della neve, a parità di massa, risulta più efficace rispetto ad una esplosione con la carica posizionata all'interno e sulla superficie.

A dimostrazione di ciò, il grafico di Ingram (Cresta R.-2002), riportato all'interno del Capitolo 3 in Figura 3.14, dimostra l'esistenza di una quota di tiro ottimale per la quale si ottiene la minimizzazione della massa di esplosivo da utilizzare, massimizzandone l'estensione del raggio efficace.

I risultati ottenuti ed il grafico di Ingram non tengono conto in alcun modo della morfologia del pendio e quindi della posizione del piano verticale della carica rispetto al piano orizzontale della superficie da bonificare.

E' perciò di fondamentale importanza, per la corretta esecuzione del tiro, conoscere in modo dettagliato la morfologia del versante, in modo da avere una idea chiara su quali siano le zone in cui si possa verificare il distacco.

I fattori morfologici e le variabili che entrano in gioco sulla stabilità del manto nevoso posizionato su un pendio sono molteplici: tuttavia si può far riferimento ad alcune condizioni morfologiche standard di cui sono noti gli effetti, tra i quali si distinguono:

- Variazione di pendenza, per la quale il manto nevoso è soggetto a due sollecitazioni distinte, ovvero: trazione della neve posizionata nella zona meno acclive del pendio, tendente all'orizzontale e compressione per la neve al piede del versante, la quale sostiene tutto il peso della massa nevosa che la sovrasta.
- Accumuli da vento: si verifica una sollecitazione alla trazione sulla neve del tratto superiore del pendio, a causa dell'azione di trascinamento dell'accumulo di neve posizionato al di sotto di essa.
- Zone di discontinuità del versante: in corrispondenza delle discontinuità si verificano interruzioni delle tensioni nel manto nevoso: esistono quindi punti del manto nevoso non sollecitati, ma lo scorrimento di un elemento può innescare il movimento a catena degli altri elementi posti più a valle.

Considerando il primo caso, nello specifico un aumento dell'acclività del pendio, si distinguono due zone: una stabile ed un'altra instabile, intervallate da una zona che rappresenta il punto in cui è possibile che si verifichi la rottura (zona critica o di distacco), come illustrato in **Figura 5.12**.

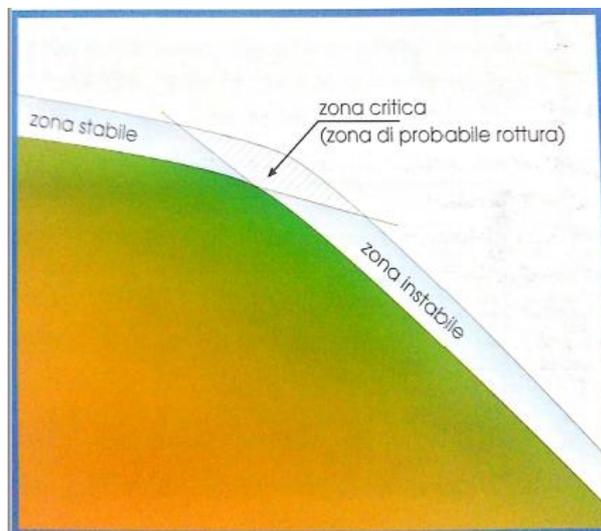


Figura 5.12- Schematizzazione variazione di acclività del pendio
Fonte: “Cresta R.-2002”

Intuitivamente si dovrebbe pensare di eseguire l'esplosione sul manto nevoso in corrispondenza di tale zona, in modo da poter sollecitare maggiormente il punto critico. Operando in queste condizioni spesso, però, si assiste ad un fallimento del tiro, perché il posizionamento della carica in corrispondenza della zona critica comporta uno spreco dell'energia fornita dalla stessa all'atto dell'esplosione.

L'onda di pressione infatti, distribuendosi sfericamente, interesserà in parte la zona instabile (l'effettiva massa da bonificare), ed in parte la zona stabile che non reagisce poiché non soggetta alla forza di gravità. Tenendo conto del concetto per il quale occorre mobilitare un grande volume di neve affinché il movimento interessi tutto il pendio, è consigliabile eseguire la detonazione della carica all'interno della zona instabile al di sotto della zona critica: in questo modo l'onda di pressione andrà ad interessare una superficie maggiore della zona instabile, concetto che si evidenzia all'interno dello schema di **Figura 5.13**.

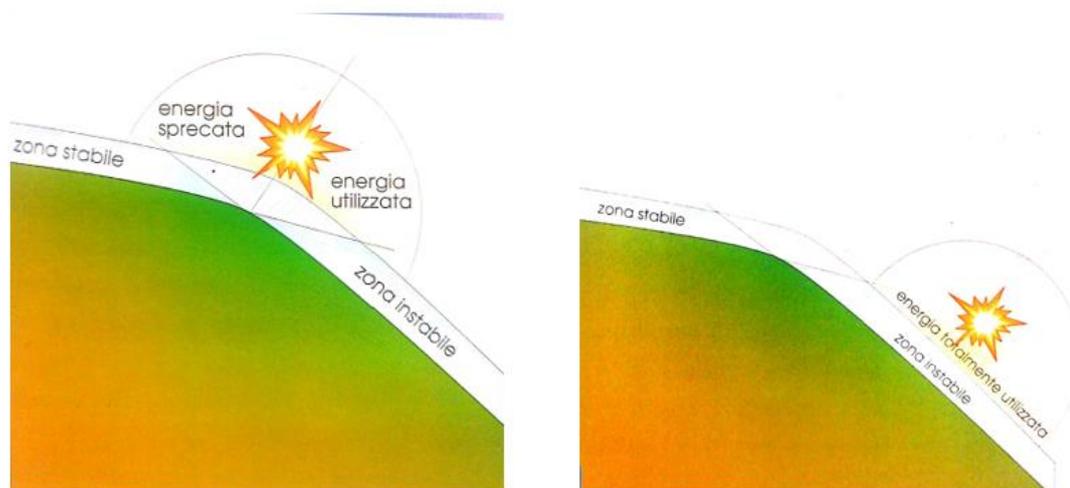


Figura 5.13- Schematizzazione dell'energia su pendio innevato
Fonte: “Cresta R.-2002”

Vista la considerazione precedente è necessario avere ben chiara l'estensione della zona di distacco e della zona instabile, in modo tale da poter valutare la corretta massa di esplosivo da utilizzare con lo scopo di massimizzarne gli effetti, coprendo correttamente tutta l'estensione del pendio da bonificare. Per ottenere un raggio efficace quanto più corretto possibile, è necessario posizionare la carica in una zona quanto più prossima al centro della zona instabile, in modo da minimizzare la dissipazione di energia.

Per il calcolo della carica da utilizzare occorre quindi tener conto dell'estensione della zona instabile del pendio, la quale può essere anche molto grande. A questo punto, considerando che il raggio efficace dell'esplosione è proporzionale alla radice cubica della carica, per cui risulta necessario aumentare di molto la massa per avere un apprezzabile aumento del raggio efficace, conviene utilizzare più cariche di massa inferiore che interessino porzioni discrete del pendio in modo da ottimizzarne l'efficacia. Tale concetto è evidenziato in **Figura 5.14** ($a \div c$).

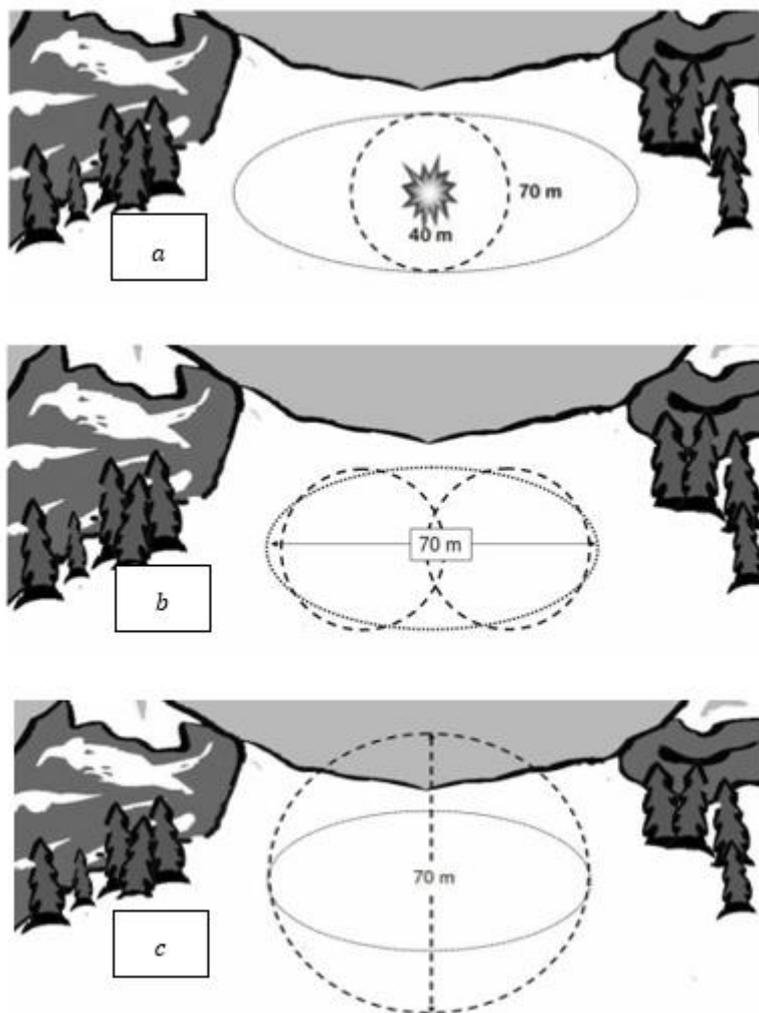


Figura 5.13 (a ÷ c) – Scelta della massa di esplosivo in funzione dell'estensione della zona instabile

In figura sono riportati i seguenti casi:

- Caso a) la zona instabile del pendio è larga 70 m e vi si applica un esplosivo influente sfericamente per 40 m; la soluzione non è ottimale, la massa è sottodimensionata e può causare il fallimento del tiro.
- Caso b) la zona instabile del pendio è larga 70 m, vi si applicano due cariche che garantiscono un'influenza areale di 30-35 m ciascuna; la soluzione è ottimale e la carica è ben dimensionata. Il fallimento del tiro può essere legato ad una cattiva scelta dell'esplosivo sulla base delle condizioni del manto nevoso.
- Caso c) la zona instabile del pendio è larga 70 m, si sceglie un esplosivo con carica influente molto maggiore; la carica è sovradimensionata, ne consegue un eccessivo



dispendio di esplosivo oltre ad una pericolosità relativa al distacco di masse nevose più grandi di quelle stimate in fase di pianificazione.

Per concludere, a livello teorico, si è visto come l'efficienza di un determinato sistema rispetto ad un altro possa variare considerando i parametri principali che influenzano l'effetto dell'onda d'urto sul manto nevoso.

Lo scopo dell'elaborato era inizialmente quello di determinare con esattezza quale dei sistemi utilizzati per l'abbattimento preventivo di valanghe risultasse più efficace.

I risultati e le considerazioni estrapolate dai calcoli e dalle ricerche bibliografiche svolte, hanno fornito delle linee guida del tutto generali sulla scelta dell'esplosivo e sull'efficienza del sistema Gazex.

L'argomento ovviamente è molto più ampio di quanto sia stato possibile trattarlo: ulteriori considerazioni dovrebbero essere svolte sulla base dei costi di investimento necessari per l'installazione dei sistemi fissi come il Gazex; difatti, come anche l'evidenza sperimentale conferma, tale sistema in termini di efficacia di distacco offre sicuramente prestazioni maggiori rispetto all'utilizzo dell'esplosivo, per il quale il buon esito del tiro è fortemente influenzato dall'esperienza del fuochino, dalla correttezza della stima del punto zero, inteso come punto che massimizza le probabilità di distacco delle valanghe e dalla valutazione della massa della carica da impiegare. Si tratta di fattori facilmente influenzabili dall'errore umano. Altro elemento non trascurabile è la sicurezza degli operatori e la possibilità di operare sempre indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, e tempestivamente.

Da questo punto di vista i sistemi fissi rappresentano una svolta, poiché il loro utilizzo non è vincolato alle condizioni atmosferiche e la sicurezza è garantita dai controlli da remoto.

Il loro elevato impatto ambientale è tuttavia da non trascurare: difatti tali strutture sono in antitesi con il paesaggio montano, oltre al fatto che presentano l'ovvio inconveniente, che per certi versi è anche il loro punto di forza, di essere installate in posizione fissa.

Il loro posizionamento è sicuramente basato su criteri di progettazione che tengono conto della localizzazione media della zona instabile e dell'altezza media del manto nevoso, in modo da ottenere gli effetti desiderati.



I suddetti parametri progettuali sono peraltro soggetti a sostanziali variazioni durante le diverse stagioni, e di conseguenza è possibile che si verifichino stagioni ottimali per le operazioni eseguite con i sistemi fissi, e stagioni in cui è necessario implementare il loro impiego con interventi puntuali e mirati tramite esplosivo.



Bibliografia

AA.VV.–2011–“Neve e valanghe: Speciale progetto Dynaval”. AINEVA

AA.VV.–2016– “Dicembre 1916:Il mese della morte bianca”. Universität Bern

Atlas Powder Company –1987– . “Explosives and rock blasting”. Dallas, Texas, USA. ISBN
0-9616284-0-5

Bruno E., Maggioni M., Freppaz M., Zanini E.–2012– “Distacco artificiale di valanghe: linee
guida per la procedura operativa, metodi e normativa”. Regione Autonoma Valle d’Aosta

Calzia J. –1969 – “Les Substances Explosives et Leurs Nuisances”. Dunod Paris.

Cardu M., Chiaia B., Chiaravallotti L., Cornetti P., Frigo B. –2007– “Modello meccanico
per l’innescò di valanghe di neve”. GEAM

Chiaravallotti L. E. –2006– “Tesi magistrale: Meccanica dell’innescò di valanghe nevose
tramite esplosivo”. Politecnico di Torino

EFEE –2004– “Training manual for rock blasting educaton”. European Shotfirer Standard
Education for Enhanced Mobility. ESSEEM.

Frigo B., Barbero M., de Biagi B., –2012– “A CBA of artificial avalanche release device in
ski resort: MonteRosa SKI (AO-Italy) case study”. Politecnico di Torino

Frigo B., Chiaia B., Cardu M. –2012– “Snowpack effects induced by blast: experimental
measurements vd theoretical formulas”. ISSW

Frigo B. et al.–2010– “Experimental analysis of snowpak effects induced by blast”.
Politecnico di Torino

Fuzinaz H. .–2010–“Tesi Magistrale: Vulnerabilità delle costruzioni a rischio valanghe:
applicazione ad un evento in Valle d’Aosta”. Politecnico di Torino

Huntington-Thresher W.K.E.,Cullis I.G. –2001–“TNT blast scaling for small charges”.
Defense Evaluation and Research Agency, For Halstead, Sevenoaks, Kent TN14 7BP UK



Mancini R., Cardu M. –2010– “Scavi in roccia – gli esplosivi”. Helvelius E., Benevento.

McClung D., Schaerer P. –2000– “Manuale delle valanghe – Formazione, Dinamica ed effetti, Prevenzione e sicurezza, Soccorso”. Zanichelli Ed., Bologna.

Miller D.A. et al. –2011– “An explicit numerical model for the study of snow’s response to explosive air blast”. Department of Civil Engineering, Montana State University, USA.

Praolini A., Tognoni G., Turrone E., Valt M. – 2019– “Le valanghe”. AINEVA

Pravisani S.P.A.-Schede tecniche esplosivi

Renato Cresta –2002– “L’esplosivo e la Neve”. Club Alpino Italiano-Servizio Valanghe Italiano

Siti consultati:

<https://www.snipertechnology.it>

<http://www.fassafront.com>

<https://www.agi.it>

<http://www.scialp.it>

<https://www.slf.ch>

<http://www.tas.fr>