

POLITECNICO DI TORINO

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

Tesi di laurea magistrale

Valutazione di metodologie per il distacco artificiale di valanghe nevose



Relatore: Prof. Marilena Cardu

Candidato: Edoardo Giors Reviglio

Marzo 2021

Abstract

The work describes the advantages of the artificial snow avalanche detachment and the characteristics of the different methodologies known and widespread to realize it. The knowledge of the physical-mechanical characteristics of snow, as well as the mechanisms of interaction that it develops with respect to the techniques of detachment are fundamental for these considerations. Different types of explosives are tested, as they are possible instruments of detachment induction, in order to provide a preliminary evaluation of the efficiency of the explosive-snow pair: this parameter, together with evaluations about the optimal positioning of the charges, provides a starting point for the choice of the optimal technique to adopt. From the study it seems that deflagrating explosives, as well as low sensitive explosives, are more effective than high explosives, given their lower speed and the production of a greater volume of gas due to their reaction.

Riassunto

L'elaborato descrive i vantaggi che derivano dall'utilizzo del distacco artificiale di valanghe nevose e le caratteristiche delle differenti metodologie ad oggi note e diffuse per realizzarlo. Per tali considerazioni sono fondamentali la conoscenza delle caratteristiche fisico-meccaniche della neve, nonché i meccanismi di interazione che essa sviluppa rispetto alle tecniche di bonifica. Vengono trattati differenti tipi di esplosivo, in quanto possibili strumenti di induzione del distacco, allo scopo di fornire una preliminare valutazione sull'efficienza della coppia esplosivo-neve: tale parametro, insieme a valutazioni circa il posizionamento ottimale delle cariche, fornisce una base di partenza per la scelta della tecnica ottimale di intervento. Dallo studio emerge che gli esplosivi deflagranti, come pure i detonanti sordi, sembrano avere maggiore efficacia rispetto ai detonanti sensibili, data la velocità di reazione più lenta e la possibilità di generare un maggiore volume di gas.

Sommario

1	Capitolo 1. La neve e le sue caratteristiche	8
1.1	Proprietà fisico-meccaniche della neve	8
1.2	Metamorfismi della neve	15
1.3	Il manto nevoso e le sue interazioni con l'ambiente esterno	17
1.3.1	Temperatura	18
1.3.2	Eventi atmosferici	19
1.3.3	Radiazione solare	20
1.3.4	Pressione nivostatica	21
1.3.5	Altre variabili	22
1.4	Forze agenti sul manto nevoso	23
1.4.1	Stabilità del manto nevoso	26
1.5	Le valanghe	27
1.5.1	Valori critici di innesco delle valanghe	31
2	Capitolo 2. Il distacco artificiale e l'esplosivo	33
2.1	Premessa	33
2.2	Il distacco artificiale	33
2.2.1	Origine e storia del distacco artificiale	34
2.2.2	Vantaggi e svantaggi del metodo	35
2.2.3	Piano di Intervento per il Distacco Artificiale	36
2.3	Esplosivi	36
2.3.1	Tipologie di esplosivo	38
3	Capitolo 3. Tecniche per il distacco artificiale di valanghe	41

3.1	Premessa.....	41
3.2	Tecniche di intervento con esplosivo	42
3.2.1	Premessa	42
3.2.2	Il TNT equivalente	44
3.2.3	Lancio a mano	45
3.2.4	Artiglierie.....	45
3.2.5	Lanciarazzi	46
3.2.6	Avalancheur.....	46
3.2.7	Brillamento da mezzo aereo	47
3.2.8	Catex.....	48
3.2.9	Wyssen charge dropper	49
3.2.10	Wyssen tower.....	50
3.3	Sistemi con miscele gassose esplosive	51
3.3.1	Premessa	51
3.3.2	Gazex.....	53
3.3.3	Avalhex	56
3.3.4	Daisybell	58
3.3.5	O’bellx.....	60
3.3.6	APR Sniper	61
3.4	Scelta del sistema ottimale.....	62
4	Capitolo 4. Interazioni neve-esplosivo	64
4.1	Premessa.....	64
4.2	Trasmissione dell’onda d’urto	64
4.2.1	Influenza dell’impedenza sulla trasmissione delle onde	65

4.3	Effetti del posizionamento della carica	67
4.3.1	Teoria del cratere	67
4.3.2	Esplosione della carica all'interno del manto nevoso.....	69
4.3.3	Esplosione della carica sulla superficie del manto nevoso	71
4.3.4	Esplosione della carica in aria	72
4.4	Utilizzo ottimale della carica	74
4.4.1	Confezionamento delle cariche.....	74
4.4.2	Tempistiche ottimali di tiro	75
4.4.3	Macro-aree ottimali di tiro.....	76
4.4.4	Micro-aree ottimali di tiro.....	81
5	Capitolo 5. Sperimentazioni sull'efficienza degli esplosivi	84
5.1	Emulsione VS dinamite	84
5.1.1	Caratteristiche del sito e degli esplosivi utilizzati	85
5.1.2	Realizzazione del test	85
5.1.3	Risultati ottenuti.....	86
5.1.4	Conclusioni	91
5.2	Nonex vs GBT	91
5.2.1	Caratteristiche del sito e degli esplosivi.....	91
5.2.2	Realizzazione del test	92
5.2.3	Resoconto prove	93
5.2.4	Conclusioni	95
5.3	Sniper vs Autostem.....	96
5.3.1	Caratteristiche del sito e degli esplosivi.....	96
5.3.2	Realizzazione del test	99

5.3.3	Resoconto prove	99
5.3.4	Conclusioni	105
6	Conclusioni	106
7	Bibliografia	111

Introduzione

Cento vite ogni anno: questo è il bilancio medio delle vittime causate dalle valanghe ogni anno sull'intera Catena delle Alpi, dall'Italia alla Svizzera, all'Austria e alla Francia. Si segnala però che la quasi totalità di questi incidenti si realizza durante lo svolgimento di attività definite non troppo sicure quali sci alpinismo, sci fuori pista ed escursioni di alpinismo.

Il dato positivo in Italia è che non si segnala quasi nessuna vittima in seguito a valanghe abbattutesi su abitazioni e vie di comunicazione [1]. Questo risultato notevole è stato raggiunto negli anni spesso ricorrendo a misure di protezione passiva per mettere in sicurezza queste strutture. Tuttavia, il ricorso ad una capillare messa in sicurezza e bonifica di pendii con masse nevose in condizioni di precaria stabilità, attraverso mezzi di difesa attiva, avrebbe garantito un notevole risparmio economico ed un impatto ambientale minore.

Alcuni di questi dati sono utili per comprendere perché il distacco artificiale delle masse nevose instabili sia una tematica significativa per quanto concerne gli ambiti di protezione civile e di pianificazione territoriale. La buona riuscita di questi tipi di interventi condiziona la sicurezza in ambiente montano, la salvaguardia delle vite umane e la tutela del patrimonio rappresentato dal turismo invernale.

Nel seguito dell'elaborato verranno trattate le più recenti misure di difesa attiva e quelle più innovative in fase di sperimentazione e verrà valutata l'efficacia di differenti tipologie di esplosivo per il loro impiego nella neve. Verranno inoltre descritte alcune delle sperimentazioni realizzate negli anni passati in collaborazione con il Politecnico di Torino nell'ambito dell'accoppiamento neve-esplosivi nonché le prove sperimentali realizzate nell'ambito del presente elaborato.

1 Capitolo 1. La neve e le sue caratteristiche

1.1 Proprietà fisico-meccaniche della neve

Lo studio circa l'utilizzo di metodologie di bonifica di versanti nevosi deve necessariamente prescindere dalle caratteristiche fisico-meccaniche della neve, che sono funzione sia delle proprietà interne sia di fattori esterni, e che possono sviluppare sul manto nevoso azioni stabilizzanti oppure destabilizzanti. Le caratteristiche di maggiore interesse per le considerazioni svolte sono: la densità, la reptazione, la coesione, l'angolo di attrito, la durezza e la resistenza al taglio.

La densità dipende fondamentalmente dall'umidità, dalla forma e dalla dimensione dei grani nevosi. I valori di densità della neve sono compresi nell'intervallo 30-50 kg/m³ per la neve fresca e 500-800 kg/m³ per la neve metamorfosata. Questi valori hanno una grande variabilità a causa del comportamento molto particolare della neve che plasticizza facilmente decrementando il valore dell'indice dei vuoti senza recuperare le deformazioni subite.

Tali deformazioni sono principalmente dovute a:

- Separazione dei grani in condizioni di trazione
- Compattazione dei grani a causa di fenomeni di compressione
- Scorrimento dei grani per sollecitazioni di taglio

La somma degli sforzi di taglio e di compressione all'interno del mezzo viene definita "reptazione" ed è responsabile, assieme allo slittamento, dei movimenti verso valle del manto nevoso (*Figura 1.1*) [1].

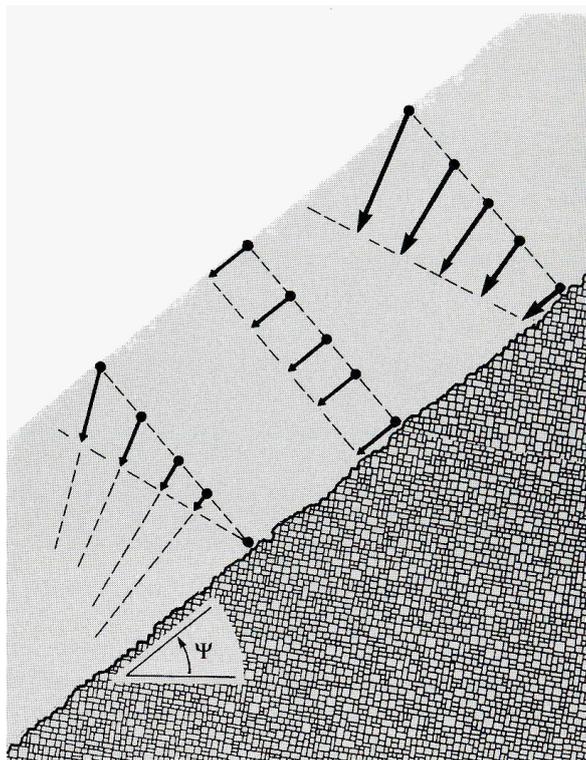


Figura 1.1 Reptazione (indicata dai vettori a sinistra) e scivolamento del manto nevoso (vettori in centro), forniscono il movimento totale verso valle (vettori a destra), McClung & Schaerer, 2000

Nella maggior parte dei casi, però, l'innesco di valanghe è dovuto a sforzi di taglio, che generano la rottura del manto e che sono funzione della coesione e dell'angolo di attrito. Il comportamento della neve nei confronti della resistenza al taglio viene ben approssimato dal criterio di Coulomb (schematizzato in *Figura 1.2*).

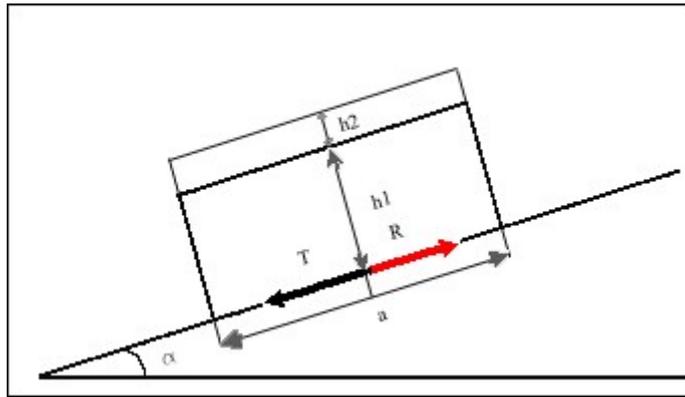


Figura 1.2 Equilibrio di un blocco di neve, secondo la teoria di Coulomb (ridisegnato da Giani, 2006)

L'equilibrio del blocco in *Figura 1.2* è garantito quando la forza attiva T e la forza resistente R presentano lo stesso valore. Prendendo in considerazione anche un eventuale sovraccarico dovuto ad un nuovo strato di neve, si possono scrivere le formule:

$$T = (\rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2) \cdot a \cdot \sin \alpha \quad (1.1)$$

$$R = c \cdot a + (\rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2) \cdot a \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi \quad (1.2)$$

In cui:

- ρ = densità della neve [kg/m^3]
- φ = angolo di attrito
- $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$, accelerazione di gravità
- h = altezza dello strato di neve [m]
- a = area di appoggio del blocco [m^2]
- α = angolo di inclinazione del pendio

Il criterio che ne deriva può essere rappresentato, imponendo l'eguaglianza che garantisce l'equilibrio dalla formula:

$$T = R \Rightarrow \tau_R = c + \sigma \tan \varphi = c + (\rho g h \cdot \cos \alpha) \cdot \tan \varphi \quad (1.3)$$

In cui τ rappresenta gli sforzi di taglio e σ quelli di compressione, garantiti dal peso degli strati sovrastanti. In un grafico τ/σ , in cui vengono riportati alcuni risultati sperimentali di coppie di valori che portano alla rottura campioni simili di neve, si può stabilire il criterio di resistenza (o di rottura) della neve secondo Mohr-Coulomb (*Figura 1.3*). La retta interpolante i valori critici, che si può considerare come retta limite, rappresenta un involucro di rottura, che delimita due aree del grafico: al di sotto di essa si ha compatibilità tra sforzi applicati e deformazioni del materiale, mentre al di sopra, si è in un campo in cui si verifica la rottura del materiale.

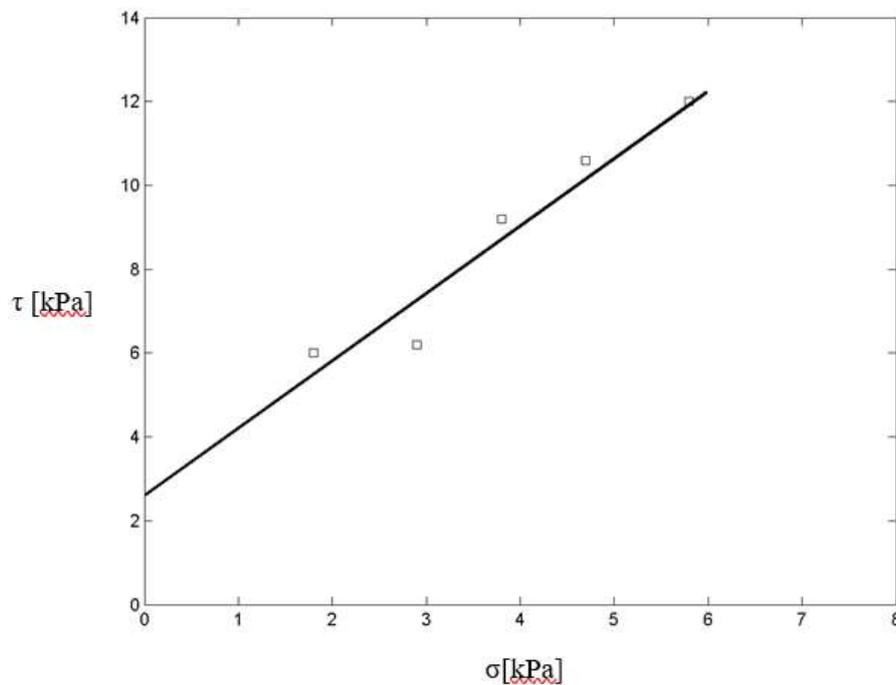


Figura 1.3 Criterio di Mohr-Coulomb per la neve (McClung & Schaerer, 2000)

Nello spessore nevoso la coesione è funzione del tipo di legame che si instaura tra i grani. Questi possono essere di tre tipologie:

- Legami per fusione e rigelo: fenomeni di superficie oppure più profondi dovuti al rigelo e alla conseguente creazione di stati rigidi per opera dell'acqua meteorica o derivante da fusione che percola all'interno del manto.
- Legami per capillarità: fenomeno di unione dei cristalli a causa della suzione garantita dalla pellicola d'acqua presente tra i grani.
- Legami per feltratura: unione dei cristalli per opera delle ramificazioni dendritiche che si legano tra loro.

All'interno del grafico τ/σ , per la definizione del criterio di resistenza, la coesione è data dall'intercetta della retta con l'asse delle ordinate, come si può vedere nel grafico di *Figura 1.4*.

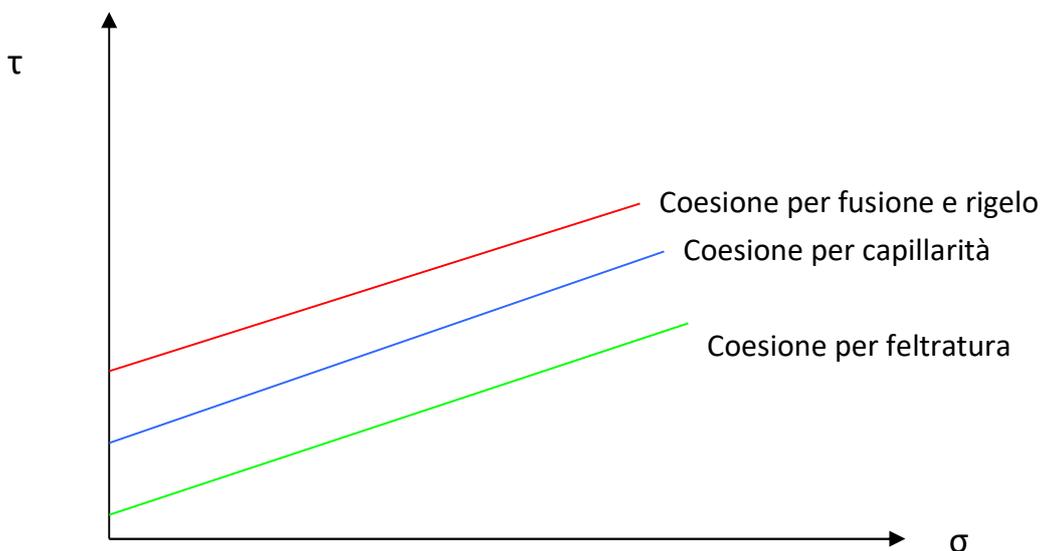


Figura 1.4 Criterio di resistenza per la neve (Chiaravalloti, 2006)

Per quanto concerne l'angolo di attrito, questo, per un materiale granulare è definito come l'angolo di riposo che esso assume se fatto cadere dall'alto e lasciato accumulare liberamente su di un piano. Questo parametro, in ambito geotecnico, indica la resistenza opposta al movimento da parte dei grani del materiale di uno strato rispetto a quelli di un altro. Nel caso degli studi circa la neve, subentrano alcune complicazioni, poiché l'angolo di attrito è funzione della tipologia dei grani, della loro coesione ed anche del tenore di acqua libera.

Nella neve, inoltre, sono presenti due tipologie distinte di angoli di attrito: quello statico e quello cinetico. L'angolo di attrito statico è definito come l'inclinazione massima che può assumere la neve ed oltre la quale essa si mette spontaneamente in movimento, mentre l'angolo di attrito dinamico definisce l'inclinazione minima alla quale la neve già in movimento continua a scivolare. Sostanzialmente, il primo risente ancora dei legami tra i grani, mentre il secondo fa riferimento ad una situazione in cui tali legami non esistono più.

Nel grafico in *Figura 1.4* l'angolo di attrito statico è rappresentato dall'inclinazione della retta che definisce l'involuppo di rottura. Valori tipici dell'angolo di attrito statico possono variare da 15° a 50°: inclinazioni basse descrivono il comportamento di neve ad alto tenore di acqua, mentre alti valori riguardano la neve che ha sviluppato forte coesione tra i grani (*Figura 1.5*) [2].

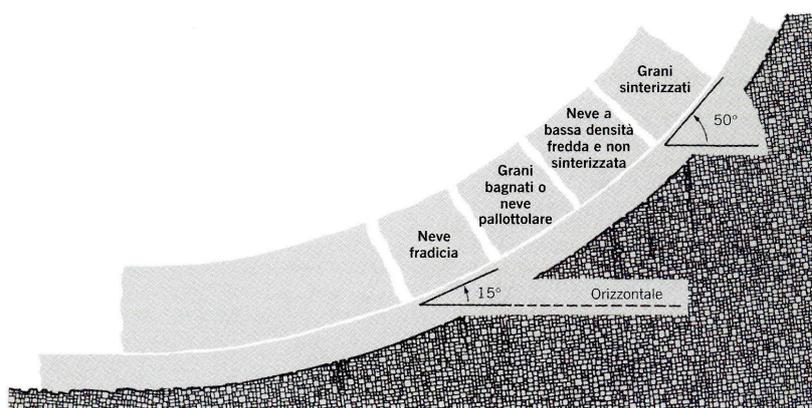


Figura 1.5 Angolo di attrito statico per varie tipologie di neve (Barbolini, 2004)

Altra caratteristica da considerare è la durezza: essa infatti può essere un ottimo indicatore per valutare la stabilità del manto nevoso, in quanto rappresenta la capacità del mezzo di resistere alle deformazioni indotte da sollecitazioni di compressione. Gli strati più teneri risulteranno maggiormente instabili ma va anche detto che il maggior grado di instabilità si manifesta quando si interfacciano due strati con una grande differenza di durezza.

La resistenza al taglio è la capacità della neve di resistere ad una sollecitazione indotta dall'azione di due forze parallele e contrarie che agiscono all'interfaccia tra diversi strati all'interno del manto nevoso e il cui superamento implica spesso il distacco della valanga. La resistenza al taglio a sua volta varia in funzione di altri quattro parametri:

- La densità: un incremento di densità causa un aumento di resistenza al taglio;
- La dimensione e la forma dei grani: grani arrotondati garantiscono maggiore resistenza e maggiore compattazione;
- Il sovraccarico: l'aumento della componente perpendicolare della forza peso del manto nevoso su uno strato debole comporta anche un aumento dell'attrito;
- La temperatura: l'abbassamento della temperatura rende la neve più dura e più resistente al taglio.

Oltre alla resistenza al taglio, è necessario analizzare anche la resistenza alla compressione e alla trazione, che sono anch'esse diverse a seconda della tipologia di cristalli nevosi e a seconda delle differenti sollecitazioni che subiscono. La resistenza alla compressione della neve aumenta proporzionalmente all'addensamento dei cristalli, basti pensare ad esempio all'effetto che ha il passaggio di uno sciatore sulla neve fresca: essa cede sotto il peso dello sciatore, ma gli sci, dopo essere sprofondati di una certa entità, scorrono sulla neve fresca che è stata compattata dal peso stesso dello sciatore senza sprofondare ulteriormente. La resistenza a trazione della neve è molto ridotta e, come per la maggior parte dei materiali naturali, è pari a circa $1/7 \div 1/10$ della resistenza a compressione. A causa della grande differenza tra la resistenza a compressione e quella a trazione, la neve avrà un diverso comportamento a seconda che si trovi su un pendio concavo o su uno convesso. Su un profilo concavo, infatti, sarà sollecitata a compressione, manifestando una stabilità

maggiore, mentre su un profilo convesso sarà sollecitata a trazione, manifestando una stabilità minore (Figura 1.6).

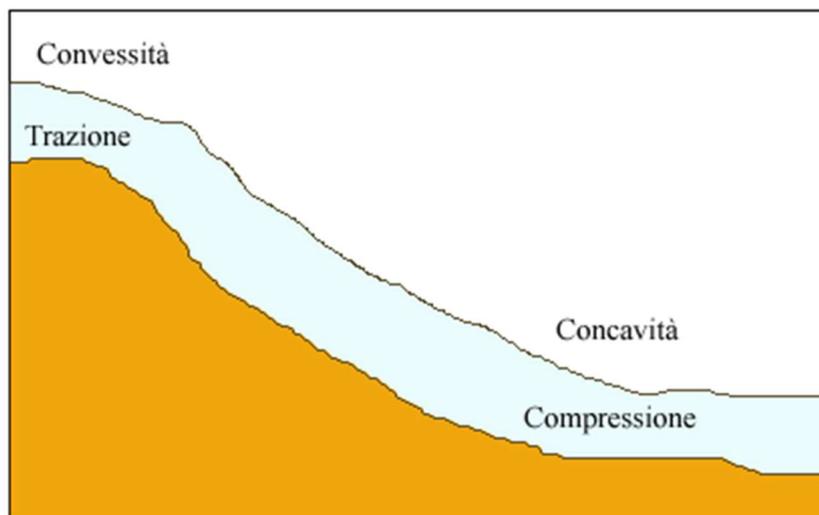


Figura 1.6 Distribuzione degli sforzi all'interno di un pendio con copertura nevosa costante (McClung & Schaerer, 2000)

1.2 Metamorfismi della neve

L'insieme dell'azione dei parametri che influenzano forme e dimensioni dei cristalli di neve nel manto nevoso fanno sì che questo assuma un aspetto stratificato in cui ogni strato ha caratteristiche fisico-meccaniche diverse. L'eterogeneità tra i differenti strati è alla base della creazione di fenomeni di instabilità ed è a sua volta accentuata dai fenomeni metamorfici che il manto nevoso subisce. Questi fenomeni nascono dall'azione congiunta di pressione e temperatura e possono essere di tre tipologie:

- Metamorfismo da gradiente di temperatura: il processo metamorfico è imputato ad un forte gradiente di temperatura. All'interno di un deposito di neve vi sono, oltre a significative variazioni di temperatura tra gli strati, anche significative variazioni di pressione di vapore. Per questo si ha una trasmissione di materiale dalle zone più calde e a pressione maggiore verso le zone più fredde del manto nevoso: ciò causa un

accrescimento dei cristalli più freddi e un fenomeno inverso per quelli più caldi (Figura 1.7).

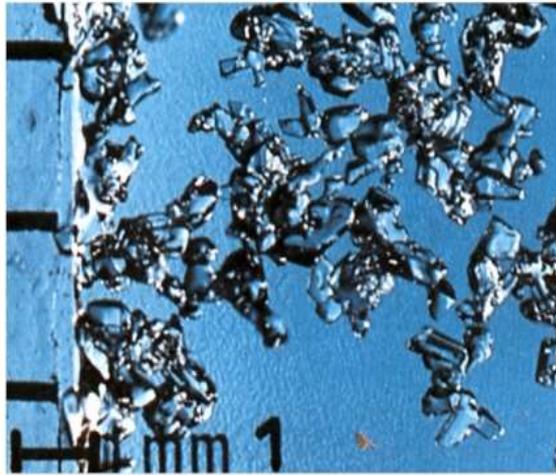


Figura 1.7 Metamorfismo da gradiente di temperatura (Chianale, 2001)

- Metamorfismo da isotermità: il processo metamorfico avviene a causa della tendenza della neve a rinsaldare la sua struttura originaria. Questo tipo di metamorfismo agisce prevalentemente durante le prime ore dopo il deposito della neve al suolo, prima che si sviluppino gradienti termici significativi. Le conseguenze sono un generale arrotondamento dei grani ed un rafforzamento dello scheletro di ghiaccio (Figura 1.8).



Figura 1.8 Metamorfismo da isotermità (Chianale, 2001)

- **Metamorfismo da fusione e rigelo:** il processo metamorfico è opera del continuo ciclo di scioglimento e rigelo della neve con temperatura attorno agli 0 °C. Solitamente i grani si sciolgono durante il giorno e risolidificano durante la notte. Differentemente dai due precedenti, questo metamorfismo avviene all'interno della neve bagnata, non appena viene raggiunta la temperatura di fusione. Durante la fusione dello scheletro di ghiaccio, a causa dell'immissione di calore attraverso la superficie del manto nevoso, i grani più piccoli hanno una temperatura di fusione di poco inferiore ai grani più grandi. Questa differenza è però sufficiente a determinare la fusione dei grani più piccoli rispetto a quelli più grandi. Dopo una serie di cicli di fusioni e rigeli si avrà una grande quantità di grani di notevoli dimensioni (*Figura 1.9*).

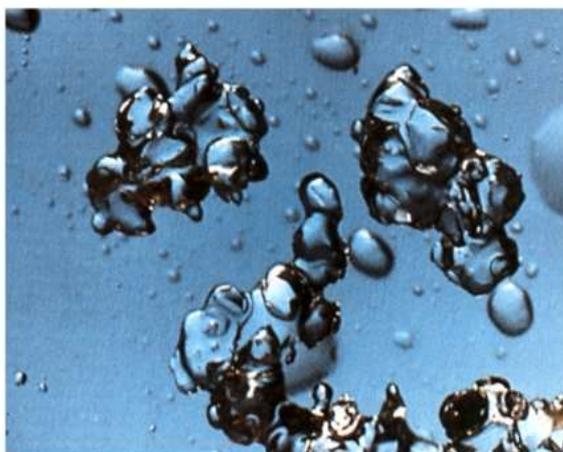


Figura 1.9 Metamorfismo da fusione e rigelo (Chianale, 2001)

1.3 Il manto nevoso e le sue interazioni con l'ambiente esterno

Oltre alle caratteristiche fisico-chimiche della neve, risulta di fondamentale importanza conoscere le complesse interazioni che si generano fra la neve e l'ambiente esterno e gli innumerevoli comportamenti aleatori che ne conseguono. Il manto nevoso è principalmente influenzato da quattro variabili ambientali: la temperatura, gli eventi atmosferici, la radiazione solare e la pressione nivostatica.

1.3.1 Temperatura

La temperatura della neve è funzione della temperatura dei due mezzi con cui è a contatto, ovvero l'atmosfera e il suolo. Tra questi tre mezzi si sviluppano continui scambi di calore. Per quanto riguarda il contatto neve-atmosfera, se la temperatura dell'aria è maggiore di quella del manto nevoso, quest'ultimo acquisisce calore e, viceversa, se è inferiore, l'aria riceve calore dal manto nevoso. Lo scambio di calore tra il suolo e la neve è invece gestito dal calore geotermico che tende a disperdersi dall'interno della terra nell'atmosfera ma che trova nel mezzo neve un buon isolante in grado di trattenerne una buona parte.

Questi due fenomeni di scambio di calore assicurano allo strato nevoso una eterogeneità di temperatura tra gli strati più vicini all'atmosfera e quelli più interni. Lo scambio di calore con l'atmosfera garantisce tuttavia maggiori variazioni di temperatura e, proprio per questo, gli strati più superficiali possono subire variazioni termiche piuttosto significative (anche 20 °C) all'interno di una stessa giornata, con fondamentali conseguenze sulla tipologia di metamorfismo che il manto nevoso può subire (*Figura 1.10*).

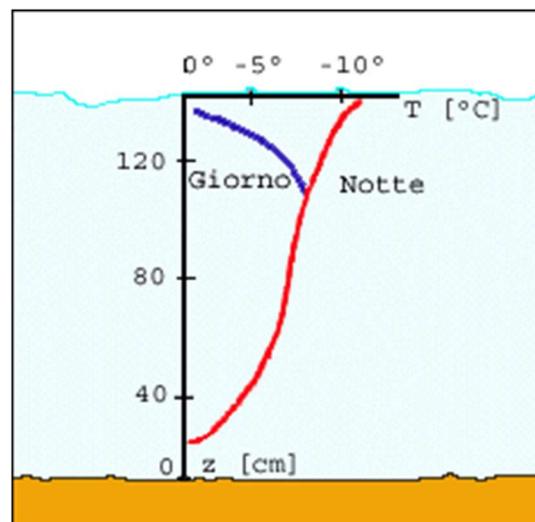


Figura 1.10 Eterogeneità di temperatura all'interno del manto nevoso (Chiaravalloti, 2006)

1.3.2 Eventi atmosferici

Tra gli eventi atmosferici, il parametro che influisce più significativamente sul cambiamento della struttura del manto nevoso, è il vento. Esso infatti agisce come acceleratore dello scambio termico tra neve e aria ed è inoltre responsabile della formazione di croste ghiacciate e di cornici sulle linee di cresta (*Figura 1.11 e Figura 1.12*). La formazione delle cornici è un fenomeno che si manifesta sui pendii sottovento, dove si instaura una brusca variazione dell'angolo di inclinazione con sviluppo di vortici d'aria e depositi di neve ventata dal pendio sottovento verso valle. Queste strutture, se raggiungono dimensioni elevate, risultano molto pericolose data la precaria stabilità e il loro crollo può innescare fenomeni valanghivi più a valle.



Figura 1.11 Formazione delle cornici di neve e direzione del vento (Meteomont, 2003)

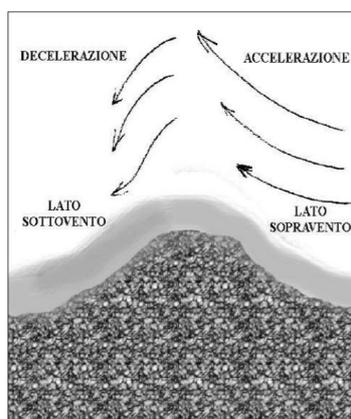


Figura 1.12 Meccanismi di formazione di una cornice di cresta legata al vento (Protezione civile, Lorusso, 2019)

Altro evento atmosferico significativamente influente sono le precipitazioni piovose che causano la riduzione dello spessore del manto nevoso e la compattazione di questo per effetto dell'aumento di peso degli strati superiori bagnati.

Infine, si citano la brina superficiale e la nebbia.

La brina si forma nelle notti fredde e serene ed è dovuta alla cristallizzazione del vapore acqueo presente nell'aria. Il problema si manifesta quando i cristalli di brina si sviluppano in zone ombrose, dove persistono nel tempo accrescendo le loro dimensioni. Questi cristalli hanno però portanza molto bassa e scarsa resistenza al taglio e, venendo inglobati nel manto nevoso in seguito a successive nevicate, possono creare superfici preferenziali di distacco, comportando un significativo incremento del pericolo.

Per quanto riguarda il fenomeno della nebbia invece, esso crea una delle situazioni più gravose per la stabilità del manto nevoso su un pendio. La nebbia infatti, analogamente alla brina, avendo una temperatura maggiore rispetto a quella della superficie nevosa, durante gli scambi di calore genera sul manto nevoso dei cristalli lamellari rettilinei e sottili. Come per la brina, questi cristalli, se inglobati nel corpo nevoso, possono creare strati instabili e favorevoli all'innesco di fenomeni valanghivi.

1.3.3 Radiazione solare

Il fenomeno della radiazione solare genera un duplice sistema di interazione con il manto nevoso: l'irraggiamento diretto e l'irraggiamento indiretto. L'irraggiamento diretto è dovuto alla diretta azione dei raggi solari sulla superficie del manto, che però influenza solo gli strati superficiali, data la quasi totale riflessione delle radiazioni solari da parte della neve (80-90%). L'irraggiamento indiretto invece è dovuto alla re-irradiazione delle onde a lunghezza maggiore da parte della terra e delle nuvole e interessa l'intero spessore del manto nevoso. Oltre al tipo di irraggiamento, la quantità di calore assorbito dal manto nevoso è da attribuire alle caratteristiche di quest'ultimo. La neve asciutta può trasformare in calore meno del 10% della radiazione che riceve, mentre quella bagnata può assorbire fino al 50%

della radiazione solare incidente su essa. In ogni caso, l'assorbimento di calore tende a generare degli strati preferenziali di scivolamento all'interno dello spessore nevoso contribuendo ad incrementarne il grado di instabilità.

1.3.4 Pressione nivostatica

La neve degli strati sovrastanti ha ovviamente una notevole influenza a livello di peso agente su quelli sottostanti. Principalmente quest'influenza consiste nell'addensamento dei cristalli di neve e in una conseguente riorganizzazione della struttura interna del manto nevoso (*Figura 1.13*). Questo porta ad un aumento della coesione tra le particelle di neve e ad una diminuzione dell'indice dei vuoti, con successiva trasformazione delle ramificazioni dei cristalli in grani nevosi dovuta alla formazione di legami per sinterizzazione.

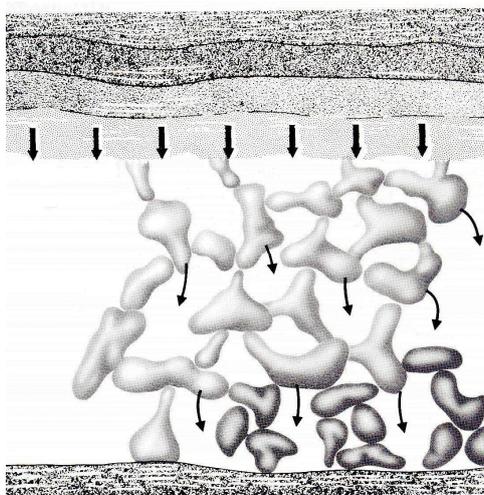


Figura 1.13 Addensamento degli strati sottostanti a causa del peso della neve sovrastante (McClung & Schaerer, 2000)

In quest'ottica si segnala anche il fenomeno del neviflusso, ovvero il lento spostamento del manto nevoso verso il fondovalle per effetto della propria forza peso. La velocità tipica di questo fenomeno è di alcuni mm/giorno ma può raggiungere anche valori di qualche m/giorno se si è in presenza di neve con elevato contenuto di acqua. Le conseguenze del

neviflusso possono essere la generazione di valanghe di piccole dimensioni oppure la formazione di crepe e fratture all'interno del manto.

1.3.5 Altre variabili

Oltre alle quattro variabili ambientali appena descritte, le quali hanno sicuramente un'influenza prioritaria sugli effetti delle trasformazioni del manto nevoso, è opportuno elencare nel seguito ulteriori fattori meno influenti, ma comunque degni di nota.

1.3.5.1 Esposizione

Per quanto citato al paragrafo 1.3.3, l'influenza dell'esposizione del versante su cui si trova la neve sui metamorfismi del manto e le conseguenti modifiche fisico-strutturali di questo non è trascurabile.

I versanti esposti a Sud, nel periodo invernale manifestano una metamorfosi distruttiva più attiva e dunque un assestamento che matura nel tempo. Dunque, il pericolo è elevato nel periodo immediatamente successivo ad una nevicata. Per contro, durante il periodo primaverile, si manifesta un incremento del pericolo durante le ore più calde della giornata.

Nei versanti esposti a Nord si nota un assestamento del manto nevoso piuttosto rallentato con la generazione di stratificazioni e di metamorfismi costruttivi. A ciò si aggiunge la frequente formazione di brina in superficie, con conseguenti situazioni di instabilità e pericolo che perdurano nel tempo.

1.3.5.2 Morfologia e scabrezza del terreno

La morfologia del terreno è responsabile della formazione di pericolose tensioni all'interno del manto nevoso. In funzione della pendenza di un versante, infatti, si creano tensioni eterogenee all'interno del manto nevoso a causa del comportamento differenziato a zone del peso della neve. In particolare, si nota che se la pendenza aumenta verso valle, si creano degli sforzi di trazione, mentre se diminuisce verso valle, si creano sforzi di compressione (*Figura 1.14*).

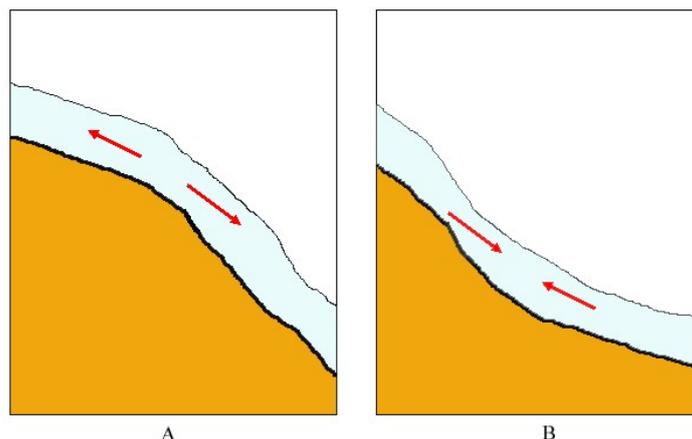


Figura 1.14 Stati tensionali nel manto nevoso in base alla morfologia del suolo (Chiaravalloti, 2006)

In aggiunta alla morfologia, sono significative le intensificazioni delle tensioni nel manto che possono verificarsi a causa della distribuzione irregolare della neve per via del vento, a causa della comparsa di strati intermedi deboli deformabili e, ancora, a causa dell'ancoraggio del manto nevoso al suolo nella parte sommitale del pendio.

La scabrezza del terreno invece non ha un'influenza troppo accentuata: l'effetto è significativo solo nel caso di manto nevoso sottile e va a svanire nel momento in cui questo supera l'altezza delle asperità. In questo ambito si ha influenza negativa sulla stabilità quando ad esempio l'erba lunga è schiacciata sul suolo e orientata verso valle oppure in presenza di rocce con orientazione della giacitura a franapoggio, mentre un'influenza positiva sulla stabilità è da attribuire in caso di presenza di fitta vegetazione arbustiva e boschiva o di rocce con giacitura a reggipoggio.

1.4 Forze agenti sul manto nevoso

Lo studio delle condizioni di stabilità di un ammasso nevoso deve inevitabilmente essere focalizzato sull'analisi delle forze agenti su esso. Affinché si manifesti un fenomeno valanghivo, è infatti anzitutto necessaria la destabilizzazione di un volume di neve, il cui movimento, una volta iniziato, possa continuare. Come precedentemente accennato, un

ruolo fondamentale è da attribuire alla forza di gravità che, per innescare il movimento, deve superare il massimo valore sopportabile dallo strato più debole tra quelli sottostanti.

Per studiare i meccanismi di stabilità e di incipiente movimento del manto nevoso, André Roch (1980) [3] ha sviluppato un'ipotesi di calcolo basata sulla scomposizione della forza peso degli strati di neve in una componente perpendicolare al suolo del pendio e in una parallela al suolo. Lo schema di analisi da lui adottato è rappresentato in *Figura 1.15*.

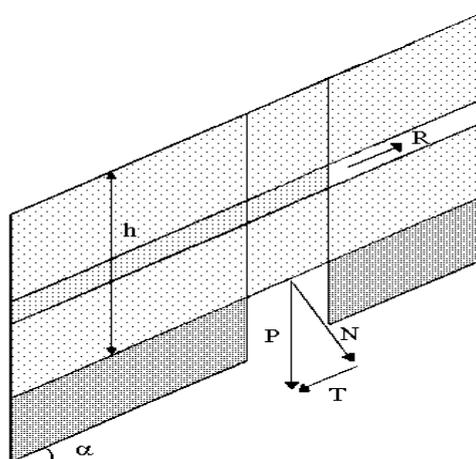


Figura 1.15 Forze agenti sul manto nevoso (Clusaz, 2005)

Si nota come la resistenza al taglio R si opponga alla forza tangenziale T , entrambe parallele al pendio. Il valore di R è funzione della coesione c , dell'angolo di attrito φ e della forza normale N :

$$R = c + N \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1.4)$$

Secondo un approccio molto semplificato, si considerano le forze agenti su un blocco di neve omogeneo poggiato su un piano inclinato, assumendo che il cinematismo che si sviluppa sia lo scivolamento lungo il pendio e non considerando la rottura a taglio all'interno del blocco di neve. La forza resistente R che si sviluppa è di tipo attritivo e, insieme alla forza

destabilizzante T , regola gli scenari che si possono sviluppare. Se $T > R$, il blocco scivola indefinitamente (*Figura 1.16*).

Ai fini dell'analisi di stabilità si introduce allora il concetto di grado di stabilità S , definito come rapporto tra le forze stabilizzanti e quelle destabilizzanti:

$$S = R/T \quad (1.5)$$

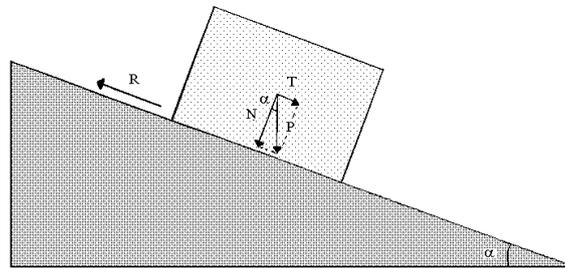


Figura 1.16 Forze agenti sul blocco omogeneo di neve (Clusaz, 2005)

Si possono quindi definire tre casistiche:

- $S > 1$, stabilità del manto nevoso;
- $S = 1$, condizione di equilibrio limite;
- $S < 1$, instabilità del manto nevoso.

Questa tipologia di analisi evidenzia in modo semplificato i fattori influenti sulla stabilità del manto nevoso ma, nella realtà, la grande eterogeneità del manto nevoso rende questo tipo di analisi eccessivamente esemplificativa [3].

1.4.1 Stabilità del manto nevoso

La stabilità di un certo volume di neve disposto lungo un pendio dipende da due componenti distinte:

- Resistenza primaria o di base: è praticamente l'influenza dell'attrito tra gli strati e non dipende dalla durezza degli strati ma dalle loro interazioni.
- Resistenze secondarie o annesse: sono la resistenza a compressione, a trazione e al taglio. Queste dipendono dalla durezza degli strati e sono tanto maggiori quanto è maggiore la durezza.

Le sole resistenze secondarie generano un equilibrio precario e rendono essenziale un elevato valore della resistenza primaria per garantire un equilibrio stabile. Se la resistenza di base è sufficiente a sostenere il peso del volume di neve su tutta la superficie del pendio, l'equilibrio è stabile, ma se le resistenze secondarie sono elevate ma è bassa quella di base, si possono generare tensioni elevate che congiuntamente alla presenza di ulteriori carichi possono provocare un distacco. In ultimo, se sono basse sia la resistenza primaria sia quelle secondarie, saranno sufficienti carichi di bassa entità per generare il distacco (*Figura 1.17*) [4].

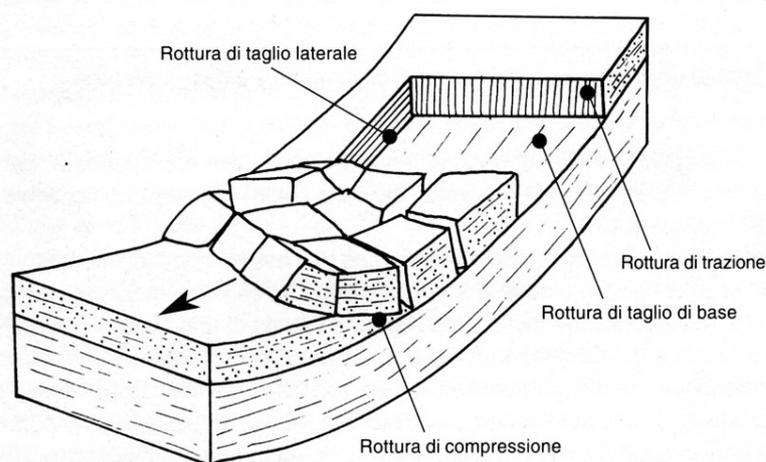


Figura 1.17 Resistenza di base e resistenze secondarie (Chianale, 2001)

1.5 Le valanghe

Con il termine valanga si intende “un colamento gravitativo rapido di una massa di neve su di un pendio di montagna” [5]. Il termine “colamento” utilizzato nella definizione pone l’accento sul fatto che, una valanga, per essere definita tale, deve sviluppare una distanza percorsa di gran lunga superiore alla dimensione della massa destabilizzata. L’aggettivo “gravitativo” invece evidenzia la tipologia di movimento che avviene dall’alto verso il basso per effetto della forza di gravità.

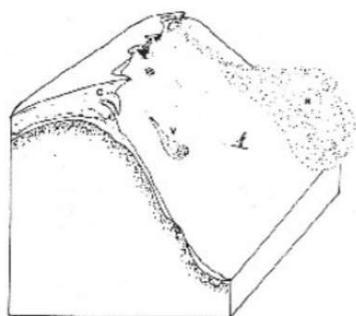
La classificazione dei fenomeni valanghivi ad oggi più accreditata è quella dell’ICSI (International Commission on Snow and Ice, 1981) [6] che si basa su elementi morfologici di facile misurazione oggettiva (*Tabella 1.1*).

Le principali distinzioni ai fini di una classificazione delle valanghe sono le seguenti:

- In funzione della superficie di scorrimento, si distinguono valanghe di superficie e valanghe di fondo
- In funzione del grado di umidità, si possono avere valanghe di neve asciutta e valanghe di neve umida
- In funzione del tipo di moto, si distinguono valanghe radenti, che scorrono a contatto col suolo, e valanghe nubiformi o polverose, se si sviluppa una sorta di nuvola di neve
- In funzione della superficie di scorrimento, si distinguono valanghe incanalate e valanghe di versante
- In funzione del tipo di innesco, si distinguono valanghe spontanee e valanghe indotte.

Il più comune criterio di classificazione per le valanghe si basa però sulla coesione dei grani nell’ammasso nevoso. Le valanghe vengono in tal caso suddivise in valanghe a debole coesione (*Figura 1.18*) e valanghe a lastroni (*Figura 1.19*). Le valanghe a debole coesione presentano una zona di innesco di piccole dimensioni, quasi puntuale, e si sviluppano nel momento in cui la forza peso con la sua componente attiva prevale sulla forza di attrito resistente. Questa tipologia di valanghe è frequente in caso di neve fresca con

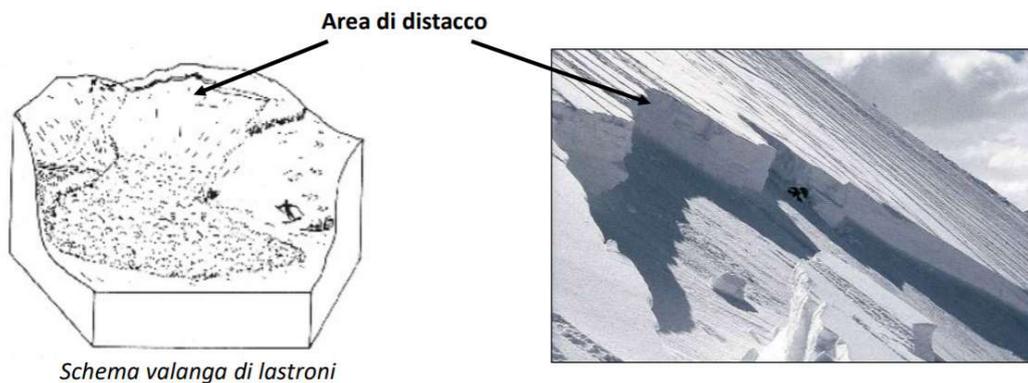
metamorfismo in fase iniziale e in caso di alti tenori di acqua presenti nello spessore di neve. In seguito all'innesco puntuale, il moto si propaga alla massa di neve sottostante sviluppando la caratteristica forma a V rovesciata. Le valanghe a lastroni sono invece dovute a scorrimenti di strati che si rompono per taglio su altri più deboli, o sul suolo stesso del pendio.



Schema valanga di neve a debole coesione



Figura 1.18 Valanga a debole coesione (Protezione civile, Lorusso, 2020)



Schema valanga di lastroni

Figura 1.19 Valanga a lastroni (Protezione civile, Lorusso, 2020)

Tabella 1.1 Classificazione ICSI delle valanghe (Corso neve e valanghe, Barbolini, 2004-2005)

Classificazione morfologica delle valanghe ICSI, 1981

Zona	Criteri	Caratteristiche distintive, denominazione e codice			
ZONA DI DISTACCO	A Modo di distacco	A1 Distacco puntiforme <i>(Valanga a debole coesione)</i>	A2 Distacco lineare <i>(Valanga a lastroni)</i> A3 Lastroni teneri A4 Lastroni duri		
	B Posizione del piano di slittamento	B1 Interno al manto nevoso <i>(Valanga di superficie)</i>	B4 Sul suolo <i>(Valanga di fondo)</i>		
	C Acqua liquida nella neve	B2 Rottura in neve fresca B3 Rottura in neve vecchia	C1 Assente <i>(Valanga di neve asciutta)</i>	C2 Presente <i>(Valanga di neve umida)</i>	
ZONA DI CORRIMENTO	D Tipo di percorso	D1 Percorso su pendio aperto <i>(Valanga di versante)</i>	D2 Percorso incanalato <i>(Valanga incanalata)</i>		
	E Tipo di movimento	E1 Nube di polvere di neve <i>(Valanga nubiforme o di neve polverosa)</i>	E2 Fluente lungo il suolo <i>(Valanga radente o di neve densa)</i>		
ZONA DI DEPOSITO	F Rugosità superficiale del deposito	F1 A grana grossa <i>(Deposito grossolano)</i>	F4 A grana fina <i>(Deposito minuto)</i>		
	G Contenuto in acqua liquida del deposito	F2 Blocchi Angolosi F3 Blocchi arrotondati	G1 Assente <i>(deposito secco)</i>	G2 Presente <i>(Deposito umido)</i>	
	H Inquinamento del deposito	H1 Nessun materiale visibile <i>(Deposito pulito)</i>	H2 Inquinante visibile <i>(Deposito sporco)</i> H3 roccia, sassi, terriccio H4 Rami, alberi H5 Rottami di manufatti		

Indipendentemente dalla tipologia di valanga, comunque, si notano sempre tre zone ben distinte nel corpo del colamento gravitativo. Tali zone sono schematizzate in *Figura 1.20* e sono: la zona di distacco, la zona di scorrimento e la zona di accumulo.

La zona di distacco è l'area del pendio dove il fenomeno ha inizio e spesso si trova in corrispondenza di creste e dorsali o comunque in zone dove la neve si accumula a causa di precipitazioni localizzate oppure per azione del trasporto eolico.

La zona di scorrimento è la porzione che sta immediatamente a valle dell'area di distacco ed è spesso caratterizzata da pendenze e velocità elevate e da totale assenza di vegetazione, data la forza distruttiva della massa in moto.

La zona di accumulo si trova a valle della zona di scorrimento ed è l'area in cui la massa di neve in movimento rallenta fino ad arrestarsi. Ciò accade quando l'angolo di inclinazione del pendio è pari all'angolo di attrito dinamico e spesso ciò accade per angoli minori ai 15°.



Figura 1.20 Schematizzazione dell'area valanghiva (Praolini et al., 2019)

Per garantire una classificazione universale dei fenomeni valanghivi, sempre nel 1981 l'UNESCO ha pubblicato nell'Atlante delle Valanghe' una tabella di unificazione di tutte le classificazioni fino all'epoca in vigore (Tabella 1.2).

Tabella 1.2 Classificazione delle valanghe secondo l'Atlante Mondiale delle Valanghe (UNESCO, 1981)

Zona	Criteri		Caratteristiche distintive, denominazione e codice	
Zona di distacco	A	Modo di distacco	A1	Distacco puntiforme (valanga di neve a debole coesione)
			A2	Distacco lineare (valanga di lastroni)
			A3	Distacco misto (prima untiforme e poi lineare)
			A4	Distacco da rottura (crepaccio)
	B	Posizione del piano di slittamento	B1	Interno al manto nevoso (valanga di superficie)
			B2	Rottura in neve fresca
			B3	Rottura in neve vecchia
			B4	Sul suolo (valanga di fondo)
	C	Acqua liquida nella neve	C1	Assente (valanga di neve secca)
			C2	Presente (valanga di neve umida)
Zona di scorrimento	D	Tipo di percorso	D1	Scorrimento libero su versante
			D2	Scorrimento in vallone vincolato
	E	Tipo di movimento	E1	Nube di polvere di neve (aerosol)
			E2	Fluente lungo il suolo (valanga radente)
			E3	E1 e E2 contemporanei (valanga mista)
	F	Posizione della superficie di slittamento	F1	Scivolamento su manto di neve (valanga superficiale)
F2			Scivolamento sul suolo (valanga di fondo)	
Zona di deposito	G	Rugosità superficiale del deposito	G1	A grana grossa (deposito grossolano)
			G2	Blocchi angolosi
			G3	Blocchi arrotondati
			G4	A grana fine (deposito minuto)
	H	Acqua liquida nei detriti nevosi	H1	Assente (deposito secco)
			H2	Presente (deposito umido)
	I	Inquinamento del deposito	I1	Nessun materiale visibile
			I2	Inquinamento visibile (deposito sporco)
			I3	Roccia, sassi, terriccio
			I4	Rami, alberi
			I5	Macerie di manufatti

1.5.1 Valori critici di innesco delle valanghe

La causa dell'innesco di una valanga va ricercato nel raggiungimento di determinati valori dei parametri geografici del sito e delle caratteristiche fisico-meccaniche della neve. Il distacco di una valanga è legato principalmente a tre condizioni, che devono essere soddisfatte contemporaneamente:

- Inclinazione sufficiente;
- Resistenza di base debole;
- Neve con coesione su una superficie di slittamento critica.

Questi parametri devono contemporaneamente raggiungere un valore definito critico per garantire il distacco: se anche solo uno di questi non raggiunge il valore critico, la rottura non è fisicamente possibile.

Il valore da considerare circa l'inclinazione critica è quello della zona più ripida del pendio e non il valore medio di pendenza del pendio. L'inclinazione deve generalmente essere almeno pari a 30° perché vi sia la possibilità di un distacco. Tale valore, tuttavia non è sempre veritiero: infatti spesso ha grande influenza il grado di umidità della neve. In generale comunque è una buona approssimazione in quanto solo il 2,5 % dei distacchi avviene su pendii con inclinazione compresa tra 20° e 30° e sempre in situazioni che non hanno come causa scatenante l'inclinazione del pendio ma in cui questa ha il solo ruolo di causa predisponente. Per oltre l'80 % dei distacchi si ha un'inclinazione di almeno 35% [4].

La discussione circa la resistenza di base è già stata effettuata al paragrafo 1.4.1. Questa, facendo riferimento all'attrito tra gli strati del manto nevoso, deve avere un valore basso per garantire l'innesco di una valanga.

Infine, la stabilità del manto nevoso su un pendio non dipende tanto dai metamorfismi che si instaurano nei cristalli, quanto dal valore della coesione. La stessa forma cristallina può infatti creare uno strato debole o uno strato stabile in funzione dei casi. Ciò che è determinante sapere è se la neve si è sufficientemente legata con il vecchio strato di neve.

La neve senza coesione costituisce una condizione eccezionale. Si tratta nella maggioranza dei casi di neve fresca caduta a bassa temperatura e con vento debole.

2 Capitolo 2. Il distacco artificiale e l'esplosivo

2.1 Premessa

Le metodologie di distacco artificiale rientrano nelle categorie di interventi per la protezione civile ovvero volte alla tutela della vita umana in primo luogo e del patrimonio economico garantito dal turismo montano invernale poi. L'importanza di tali azioni è sottolineata dal dato per cui il territorio alpino italiano costituisce la zona montuosa a maggiore densità di popolazione nel mondo.

La protezione di queste zone dalle valanghe ha richiesto lo sviluppo di sistemi di difesa preventivi, che negli anni sono stati incentivati dalla ricerca scientifica e dai cambiamenti legislativi. Si fa riferimento in particolare alla tendenza di utilizzare sistemi di distacco artificiale di valanghe nevose anziché ricorrere all'impiego di opere fisse, attive o passive. Il distacco artificiale offre infatti molteplici vantaggi, quali la possibilità di agire preventivamente e ha inoltre il beneficio economico ed estetico di non dover realizzare massicce opere di protezione.

Si analizzeranno nel seguito le caratteristiche dei principali sistemi di distacco preventivo di masse nevose con lo scopo di valutare la loro applicabilità, efficienza e vantaggiosità a seconda dello scenario operativo in atto.

2.2 Il distacco artificiale

Il rischio, che sia in ambito valanghivo o non, è un concetto probabilistico che esprime la frequenza di accadimento di un certo evento capace di causare un danno alle persone. La nozione di rischio implica l'esistenza di una sorgente di pericolo e delle possibilità che essa si trasformi in un danno.

Il distacco artificiale di valanghe è un intervento che genera al momento voluto grandi sovraccarichi sul manto nevoso in grado di causare la separazione e la discesa di piccole masse di neve, evitando il loro distacco successivo a causa di un fenomeno spontaneo o indotto dall'uomo, dalla topografia o da agenti atmosferici e che potrebbe avere conseguenze gravi in termini di entità dei danni.

L'innesco artificiale, come pure quello spontaneo nel caso in cui questo sia stato previsto in tempo utile, richiede lo sgombero delle aree potenzialmente a rischio, col vantaggio però del dover interdire tale zona solo nel momento del distacco e non per un tempo indeterminato. Il rischio non può mai essere azzerato dal momento che si hanno dei beni esposti ad un pericolo, per cui le operazioni realizzate hanno solo lo scopo di ridurlo. La riduzione del rischio attraverso il distacco artificiale viene raggiunta mediante la riduzione della frequenza di accadimento dell'evento valanghivo, che è una delle due componenti del rischio.

2.2.1 Origine e storia del distacco artificiale

L'origine dei sistemi di distacco artificiale va probabilmente cercata nel periodo della Prima guerra mondiale dove essi venivano utilizzati come strumenti bellici nel conflitto sul fronte alpino tra lo schieramento italiano e quello austriaco. Le artiglierie sparavano su versanti innevati per scatenare valanghe di neve: per avere un'idea delle conseguenze dei fenomeni innescati basta pensare che nei tre inverni di guerra si annoverano oltre 80.000 vittime per valanghe. L'utilizzo del sistema per scopi civili è di qualche anno successivo, si parla di anni '30 in Svizzera e di anni '60 in Francia. I primi distacchi venivano provocati da cariche esplosive lanciate a mano, non esistevano ancora metodologie operative di riferimento e spesso le operazioni venivano condotte in maniera pressoché improvvisata.

In molti stati europei come pure in America il distacco con esplosivo è impiegato da diversi anni, mentre in Italia questo fenomeno non è così diffuso. In Italia infatti la legislazione impedisce l'utilizzo di una buona parte di questi sistemi ma consente tuttavia uno spazio operativo sufficiente per alcuni interventi efficaci.

2.2.2 Vantaggi e svantaggi del metodo

Dietro la scelta di un metodo di bonifica di un versante vi è ovviamente la valutazione dei vantaggi e degli svantaggi che tale metodologia presenta rispetto alle altre utilizzabili.

Per quanto riguarda il distacco artificiale con esplosivi, i vantaggi sono soprattutto di ordine economico in quanto possono essere evitati gli investimenti necessari per la realizzazione di strutture di difesa che sono molto onerose. Queste strutture inoltre, a causa di particolari eventi meteorologici, potrebbero anche restare inoperative per qualche inverno, non escludendo tuttavia la necessità degli onerosi interventi di manutenzione.

Per contro, gli svantaggi della scelta di questo metodo sono principalmente legati ai limiti di sicurezza imposti dall'oggetto che si vuole proteggere. Una rotabile o una pista da sci potranno essere difese con interventi di distacco artificiale, al contrario si dovrà ricorrere ad altre tecniche di difesa per la protezione di un centro abitato o di altre opere civili.

I pericoli che ne possono conseguire sono causa della combinazione di due elementi potenzialmente pericolosi, ovvero l'esplosivo e la neve. Chi, con un intervento errato, dovesse provocare un incidente sarà sicuramente accusato di inosservanza di leggi e regolamenti, ma soprattutto di aver utilizzato l'esplosivo per scopi non previsti e regolamentati.

Tra le leggi che trattano l'impiego di esplosivo, nessuna tratta del suo impiego per il distacco artificiale di valanghe. È perciò possibile dire che questa forma di impiego, più che essere permessa, non è espressamente vietata. A tutti gli effetti però si è tenuti al rispetto di ogni legge relativa a fabbricazione, commercio, trasporto, detenzione e deposito, manipolazione e impiego delle sostanze esplodenti e all'osservanza dei regolamenti di applicazione delle leggi, di sicurezza e prevenzione degli infortuni.

2.2.3 Piano di Intervento per il Distacco Artificiale

Nel caso in cui si opti per l'utilizzo di un qualsiasi metodo di distacco artificiale è necessario redigere il P.I.D.A.V. (Piano di Intervento per il Distacco Artificiale di Valanghe) [7] contenente tutte le disposizioni per lavorare in sicurezza, economia e successo. All'interno del P.I.D.A.V. devono essere presenti:

- Il Piano di Zona
- Il Catasto delle Valanghe della zona
- La determinazione dei tempi di intervento
- Le modalità di intervento
- Le misure di sicurezza
- Nominativi e incarichi dei responsabili di ogni settore operativo

2.3 Esplosivi

Per esplosione si intende una reazione chimica esotermica che libera energia e prodotti prevalentemente gassosi. Queste reazioni sono di norma rapidissime e in base alla velocità con cui si realizzano si suddividono gli esplosivi in deflagranti e detonanti.

Gli esplosivi detonanti sono caratterizzati da velocità di reazione comprese tra i 2000 e i 9000 m/s mentre gli esplosivi deflagranti hanno velocità di reazione dell'ordine delle centinaia di m/s. I detonanti, avendo velocità di reazione superiore a quella del suono nel materiale esplosivo, sono caratterizzati da un'onda d'urto causata dalla brusca differenza di pressione fra le particelle. In corrispondenza del "fronte d'urto", l'esplosivo ancora indisturbato e a temperatura e pressione ambiente subisce un incremento di pressione fino a 10000 Mpa in qualche milionesimo di secondo e raggiunge temperature fino a 600 °C. Questo processo è la vera e propria causa della generazione dell'onda d'urto. Nei deflagranti, essendo la velocità di decomposizione subsonica, ciò non può accadere.

L'onda d'urto di compressione si propaga nell'aria circostante generando un'onda retrograda, che si muove in senso contrario a quello del flusso dell'onda principale. Le due onde di pressione, diretta e retrograda, costituiscono complessivamente l'effetto dell'esplosione. Questo viene ben rappresentato dai due picchi, positivo e negativo, della pressione in *Figura 2.1*.

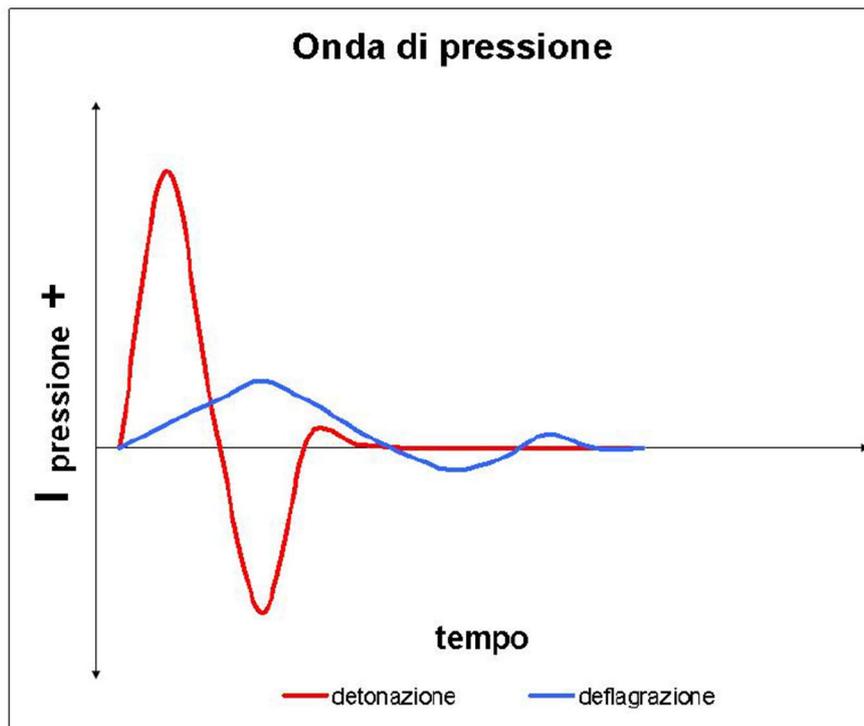


Figura 2.1 Confronto delle variazioni di pressione nei fenomeni di detonazione e deflagrazione (Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa, Progetto strategico "RISK NAT", 2012)

L'urto generato dalle due onde può avere effetti diversi nelle varie direzioni. L'onda diretta e quella retrograda infatti, incontrando ostacoli, si riflettono e possono avere differenti intensità in base alla morfologia del territorio. Si presume che l'onda di pressione inizi la fratturazione degli ostacoli e quella retrograda la completi [7].

2.3.1 Tipologie di esplosivo

2.3.1.1 *Polvere nera*

La polvere nera è l'esplosivo più antico di cui si conosce l'utilizzo. Nel corso degli anni ha trovato un impiego molto eterogeneo passando dalle applicazioni militari come propellente per il caricamento di munizioni, a quelle nell'ingegneria mineraria fino all'utilizzo per il brillamento dei fuochi pirotecnici.

La sua composizione media è al 75 % di nitrato di potassio o nitrato sodico, al 15/12,5 % di carbone vegetale e al 10/12,5 % di zolfo. Tali percentuali di composizione sono variabili a seconda delle specifiche di utilizzo che si vogliono raggiungere. Ad esempio, l'aumento della percentuale di carbone vegetale accresce la velocità di reazione, così come l'aumento della percentuale di zolfo la diminuisce.

I valori di velocità di reazione della polvere nera sono generalmente subsonici e solo in particolari configurazioni geometriche e/o di confinamento molto elevato possono superare i 1000 m/s; per questo, la polvere nera rientra nella categoria degli esplosivi deflagranti a basso contenuto energetico; questo esplosivo è inoltre facilmente deteriorabile in presenza di acqua data la sua elevata igroscopicità e per questo pressoché inutilizzabile per il distacco artificiale delle valanghe.

2.3.1.2 *Esplosivi al nitrato d'ammonio*

Sono esplosivi pulverulenti costituiti da Nitrato d'Ammonio (NH_4NO_3) combinato con altre sostanze. Il Nitrato d'Ammonio è un sale ottenuto dalla reazione tra ammoniaca e acido nitrico e il principale esplosivo che lo vede come suo costituente assieme ad un olio combustibile è l'ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil). I due componenti non sono esplosivi se presi separatamente e proprio per questo l'ANFO è molto sicuro dal punto di vista del trasporto e dello stoccaggio. Allo stesso tempo però è estremamente igroscopico e dunque l'immagazzinamento deve essere fatto con cura lontano da ambienti umidi dato che l'acqua, mandando in soluzione il nitrato ammonico, ne degrada le caratteristiche.

L'ANFO è un esplosivo secondario e dunque richiede un primario per detonare. Inoltre, essendo sordo, richiede che il primario sia a contatto con un booster di esplosivo detonante secondario sensibile, quale ad esempio una dinamite o un'emulsione, per garantire certezza d'effetto. La catena allora sarà: primario, booster e ANFO. La sua velocità di detonazione si aggira attorno ai 2000-2200 m/s.

La sua preparazione richiede un rapporto stechiometrico corretto combustibile-comburente che, se non viene rispettato, comporta la generazione di prodotti tossici in seguito all'innesco, quali ad esempio NOx (in caso di eccesso di ossigeno) e CO (in caso di difetto di ossigeno). Tale rapporto è di 94 % di Nitrato d'Ammonio e 6 % di olio combustibile.

A causa delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali costituenti, l'ANFO richiede per il suo utilizzo alcune particolari disposizioni:

- Diametro minimo della carica di 50 mm
- Impossibilità di utilizzo in ambienti umidi se non con particolari accorgimenti a causa della sua igroscopicità
- Range climatico di utilizzo tra -20 e 40 °C

A causa di queste limitazioni esistono altri tipi di esplosivo che spesso sono considerati più idonei, quali ad esempio le emulsioni. Queste hanno maggiore resistenza all'acqua e maggiore densità.

2.3.1.3 Esplosivi gelatinati

Sono esplosivi detonanti ad alto contenuto di nitroglicerina e nitroglicol gelatinizzati. La nitroglicerina è una sostanza esplosiva molto sensibile ed instabile e che dunque non potrebbe mai essere usata tal quale. Ha un'elevata velocità di detonazione e un'ottima resistenza all'acqua.

Nel 1867 Alfred Nobel ideò la dinamite miscelando nitroglicerina con polvere di diatomee. Negli anni a seguire, questa venne sostituita da altre sostanze, tra cui gli ossidanti, di più facile reperimento e in grado inoltre di aumentarne l'energia.

2.3.1.4 Esplosivi contenenti acqua

Questa tipologia di esplosivo è composta da una soluzione di nitrati in acqua e da sostanze ausiliarie. Tali componenti rendono questa tipologia di esplosivi resistente all'acqua e sicuri durante l'impiego. Per contro però, gli esplosivi contenenti acqua sono poco stabili e deteriorabili nel tempo, il che rende difficoltoso il loro stoccaggio.

Si differenziano in due categorie: gli Slurries o Water Gel e le emulsioni. Slurries ed emulsioni hanno grossomodo la stessa composizione (90% ossidanti in soluzione acquosa e 10% olii combustibili): la differenza sta nel fatto che i primi sono emulsioni "dirette" (Oil in Water) mentre le seconde sono "emulsioni inverse"(Water in Oil): ne consegue una struttura completamente differente: le emulsioni hanno una struttura a matrice alveolare all'interno della quale è dispersa la soluzione di nitrati in acqua mentre gli slurries sono costituiti da un gel di base acquosa all'interno della quale è dispersa la soluzione di nitrato d'ammonio.

3 Capitolo 3. Tecniche per il distacco artificiale di valanghe

3.1 Premessa

Il fenomeno del distacco artificiale è un meccanismo in cui si contemplanò diversi fattori tecnici e fisici che possono influenzarne la corretta esecuzione. Nel dettaglio entrano in gioco le variazioni di pressione sul manto nevoso e la fratturazione degli strati più deboli.

Nel seguito si elencano con maggiore dettaglio rispetto a quanto fatto nel paragrafo 2.2.2 gli aspetti positivi e quelli negativi circa l'utilizzo di tali metodologie.

Tra gli aspetti positivi si citano:

- La realizzazione del distacco a regola d'arte permette il franamento di una massa di neve di dimensioni inferiori rispetto a quella che si distaccherebbe per cause naturali;
- La possibilità di mettere in sicurezza il territorio a valle e di assumere le corrette misure e distanze di sicurezza, data la conoscenza del momento in cui si innesca il distacco;
- La possibilità di limitare la sospensione delle attività in loco solo per il periodo di bonifica, con conseguente limitazione di perdite economiche;
- I costi per la messa in opera di un distacco preventivo sono molto inferiori rispetto a quelli relativi all'installazione delle opere di difesa attiva e passiva.

Fra gli aspetti negativi si citano:

- La frequente difficoltà nel raggiungere agevolmente e in sicurezza le aree in cui si deve effettuare l'innesco;
- L'obbligo di procedure burocratiche per l'utilizzo di materiale esplosivo;
- Necessità di personale formato e con buona conoscenza dei materiali e dell'ambiente di esecuzione della bonifica;

- Impiego di esplosivo in situazioni critiche come ad esempio a basse temperature, in luoghi umidi e sottoposti a frequenti precipitazioni;
- Necessità di una esaustiva valutazione dei rischi connessi all'utilizzo di materiale esplosivo;
- Possibilità non remota che il distacco possa interessare aree più estese rispetto a quelle previste in fase di pianificazione.

Noti questi aspetti, le precauzioni vanno affrontate nell'ottica di una scrupolosa scelta del punto di innesco e del limite massimo di neve fresca oltre il quale il distacco non deve essere effettuato per la sicurezza degli operatori e delle aree limitrofe. L'area interessata dal distacco deve ovviamente essere messa in sicurezza attraverso l'evacuazione preventiva del personale con attenzione anche alla possibilità di un distacco 'ritardato' e dunque alla necessità di rispetto dei tempi di attesa e delle misure di interdizione all'accesso dell'area.

3.2 Tecniche di intervento con esplosivo

3.2.1 Premessa

Le estreme condizioni in cui si è costretti a lavorare obbligano l'operatore ad una oculata scelta dell'esplosivo che verrà utilizzato per il distacco artificiale. Alcune delle caratteristiche che contribuiscono alla scelta sono le seguenti:

- Stabilità: attitudine dell'esplosivo a mantenersi inalterato in normali condizioni di conservazione. L'esplosivo, consegnato in mattinata, deve essere utilizzato o distrutto nell'arco della giornata. Fa eccezione la conservazione presso un deposito temporaneo.
- Velocità di detonazione: per il distacco delle valanghe sarebbero preferibili esplosivi con una velocità di detonazione compresa tra 1000 e 2000 m/s perché, usando esplosivi più veloci, buona parte dell'energia viene dissipata nell'ambiente. Gli esplosivi con queste caratteristiche sono però difficilmente utilizzabili in ambienti umidi e poco sensibili all'innesco a bassa temperatura. Per questo motivo si ricorre

spesso ad esplosivi, come le gelatine-gomma, che hanno velocità di detonazione superiori a 5000 m/s, nonostante tale valore superi di gran lunga le velocità di detonazione consigliate, ma che si adattano più facilmente alle severe condizioni ambientali.

- Densità: rapporto tra massa e volume della carica. Influisce sulle dimensioni delle cariche da utilizzare ed è inversamente proporzionale alla velocità di detonazione: all'aumentare della densità nominale la velocità di detonazione diminuisce, finché, una volta raggiunta la densità critica, l'esplosivo non detona più.
- Resistenza al freddo: resistenza che l'esplosivo offre alle modifiche che il freddo potrebbe comportare. È significativo il caso della gelatina-dinamite che, al di sotto dei 6 °C manifesta un indurimento della cartuccia a causa della cristallizzazione della nitroglicerina. Dato che le normali condizioni di esercizio sono ben al di sotto dei 6°C, si preferisce ricorrere all'utilizzo di gelatine-gomma in cui la nitroglicerina è miscelata con nitrocellulosa di modo da abbassare il punto di congelamento sino a -20 °C.
- Resistenza all'acqua: resistenza che l'esplosivo offre in seguito al contatto con l'acqua. La maggior parte degli esplosivi viene fabbricata utilizzando sostanze idrorepellenti per aumentare la resistenza all'acqua. I più alterabili sono gli esplosivi pulverulenti che infatti sono sconsigliati per l'impiego nella neve.

A valle di queste considerazioni, l'esplosivo ottimale da impiegare per il distacco artificiale di valanghe ha le seguenti caratteristiche:

- Velocità di detonazione compresa tra i 1000 e i 2000 m/s anche se, come si è visto, si ricorre spesso ad esplosivi con velocità più elevate;
- Insensibilità ad acqua, freddo e altri agenti atmosferici;
- Uso semplice e sicuro;
- Assenza di tossicità;
- Imballaggio biodegradabile e non inquinante.

Oltre alla scelta della tipologia di esplosivo ideale, per una corretta esecuzione del tiro, è necessario anche un corretto posizionamento della carica nella potenziale area di distacco. È

inoltre necessario l'utilizzo di una corretta quantità di esplosivo e, soprattutto il suo innesco nel momento di massima instabilità del manto nevoso lungo il pendio.

3.2.2 Il TNT equivalente

Il concetto di TNT_{eq} è stato sviluppato per soddisfare la necessità di confronto tra gli effetti di differenti esplosivi. In questo modo si possono svolgere delle considerazioni di efficienza tra esplosivi con caratteristiche differenti facendo riferimento ad un unico esplosivo ovvero il tritolo [8].

Il TNT_{eq} rappresenta la massa di esplosivo necessaria ed ottenere gli stessi effetti che si otterrebbero dall'esplosione di 1 kg di tritolo. Il valore di TNT_{eq} per i diversi esplosivi si ricava partendo dalla considerazione teorica per cui l'energia relativa all'esplosione di 1 g di TNT è pari a:

$$1160 \text{ cal/g} = 4.853 \text{ MJ/kg} \quad (3.1)$$

Dividendo dunque l'energia specifica di un esplosivo per quella del TNT, ovvero 4.853 MJ/kg, e moltiplicando per la massa di esplosivo utilizzata, si ottiene il TNT_{eq} .

È stato trattato questo concetto perché le sperimentazioni realizzate nel corso degli anni hanno messo in luce come i quantitativi minimi di esplosivo da impiegare per un distacco efficace non debbano essere inferiori ai 3.6 kg di TNT_{eq} .

Va tuttavia messo in evidenza il fatto che il TNT_{eq} può risultare inadeguato per lo studio delle energie degli esplosivi: infatti alcuni di essi hanno un maggiore contenuto energetico, ma sono più lenti, da cui seguono minori effetti indotti dalla reazione di esplosione. Per la neve bisogna considerare non tanto l'energia liberata dalla carica quanto il tempo di azione dell'onda d'urto e di quella retrograda.

3.2.3 Lancio a mano

Questa tecnica consiste nel lancio o nel posizionamento manuale delle cariche esplosive. Come si può immaginare, tale tecnica non è di facile applicabilità data la necessità per l'operatore di dover raggiungere una zona potenzialmente instabile ma, nonostante i progressi tecnologici e lo sviluppo di tecniche più efficaci, non è ancora totalmente in disuso.

Il distacco manuale viene realizzato mediante due tecniche di lancio: il lancio a mano e la messa in opera per scivolata.

La prima metodologia rivela non poche problematiche in quanto, data la quasi impossibilità di lanciare una carica oltre i 20 m di distanza, è necessario raggiungere un punto di lancio che sia il più vicino possibile a quello di scoppio della carica. La difficoltà sta proprio nella localizzazione di una zona che sia tanto vicino al punto di scoppio quanto sufficientemente a distanza per essere considerata un'area sicura durante la fase di distacco. Questo problema viene evitato lanciando le cariche dall'elicottero anche se, il suo utilizzo è possibile solo per condizioni metereologiche favorevoli il che non è mai troppo facile in zone con frequenti nevicate. Un'altra problematica relativa al lancio a mano è dovuta all'inevitabile sprofondamento nel manto nevoso della carica lanciata dall'alto. Come si vedrà in seguito infatti, la carica esplodendo all'interno del manto nevoso riduce il proprio raggio d'azione.

Col metodo della messa in opera per scivolata si ovvia al problema dell'affondamento della carica nella neve, dato che questa viene fatta scorrere sul manto nevoso all'interno di sacchi di plastica o di cartone paraffinato senza penetrarvi. Questo espediente supera solo in parte il problema dello sprofondamento dato che esso permane in caso di neve fresca o umida.

3.2.4 Artiglierie

Le artiglierie sono dei cannoni senza rinculo o mortai il cui utilizzo non è però permesso in Italia ma è molto diffuso in altre nazioni come Canada, USA e Svizzera nonostante i risultati del loro impiego non siano ottimali. Ciò è dovuto al fatto che spesso la carica contenuta all'interno dei proiettili utilizzati è molto bassa e al fatto che questo esplose in profondità nel manto nevoso che, come si vedrà in seguito, non è il punto ideale. A questi aspetti

negativi si aggiunge il fatto che ogni tiro disperde nell'ambiente una certa quantità di materiale metallico e che si possano innescare nelle vicinanze altri fenomeni erosivi.

3.2.5 Lanciarazzi

I lanciarazzi sono dei cannoni simili alle artiglierie che però, a differenza di queste hanno propulsione propria e non necessitano di una carica di lancio (*Figura 3.1*). Come le artiglierie infatti il loro uso non ne è consentito in Italia. In compenso tale metodo è molto diffuso in Svizzera dove però i risultati ottenuti non sono stati ottimali: percentuale di distacchi inferiore al 50 % e percentuale di colpi inesplosi del 0.25 %. La mancata esplosione dei colpi è stata imputata al fatto di tirare su una coltre di neve troppo spessa in cui la neve rallentava la corsa del percussore impedendogli di colpire il detonatore con energia sufficiente ad innescare l'esplosione oppure alla eccessiva distanza dal bersaglio con le stesse conseguenze.



Figura 3.1 Caricamento di un lanciarazzi (Bruno E. et al., 2012)

3.2.6 Avalancheur

La tecnica si basa sull'impiego di un cannone pneumatico capace di sparare un proiettile di diametro 40 mm e lunghezza 1.8 m (*Figura 3.2*). Grazie all'azoto in pressione anche fino a 30 bar il cannone può sparare il proiettile con una gittata massima di 2 km e con la possibilità di superare un dislivello di 700 m. Il proiettile è costituito da una miscela liquida di due componenti che presi separatamente sono inerti e dunque facilmente trasportabili,

manipolabili e miscelabili in sito ed è progettato per esplodere sopra il manto nevoso in modo da ottimizzare il raggio d'azione dell'esplosione. Anche questa tecnica non è consentita in Italia a causa delle restrizioni legislative ma trova largo impiego in Francia e in Svizzera soprattutto grazie alle caratteristiche di rapida degradazione dei proiettili inesplosi ed al fatto che il lancio è effettuato da remoto in modo da minimizzare i rischi per l'operatore.



Figura 3.2 Sistema Avalancheur (lacroix-defense.com)

3.2.7 Brillamento da mezzo aereo

È un sistema di rilascio di esplosivo da un elicottero il cui esempio più significativo è quello prodotto dalla società italiana Vassale S.r.l. Tale metodo è stato ideato per l'utilizzo sul territorio italiano dove non è consentito il trasporto di esplosivo innescato a bordo dell'elicottero. L'innescò dell'esplosivo avviene infatti solo quando la massa esplosiva, rilasciata dall'elicottero in fase di hovering, ovvero in fase di stazionamento ad altitudine costante dal suolo, è posizionata sulla neve (Figura 3.3). La massa esplosiva è costituita da tritolo, esplosivo militare estremamente dirompente oppure ANFO innescati da un detonatore costituito da tritolo in polvere. Il detonatore a sua volta è innescato tramite una miccia a lenta combustione da un operatore a bordo dell'elicottero solo dopo aver posizionato il sistema Vassale sul manto nevoso. La sicurezza del sistema è dovuta al fatto che la carica principale esplose solo in seguito al booster che a sua volta esplose tre minuti

dopo l'accensione della miccia permettendo così all'elicottero di allontanarsi dalla zona. La geometria del sistema inoltre è studiata in modo da ridurre al minimo il rischio di rotolamento o scivolamento della carica anche sui pendii più ripidi e ghiacciati.

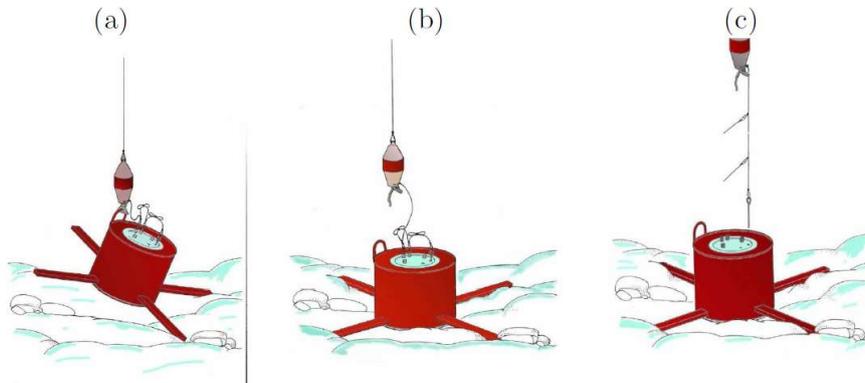


Figura 3.3 Posizionamento (a), sgancio (b) e rilascio della carica Vassale (c) (Bruno E. et al., 2012)

3.2.8 Catex

È un sistema di trasporto e rilascio di cariche esplosive costituito da un circuito chiuso lungo un pendio consistente in un cavo d'acciaio mobile di diametro compreso tra 8 e 9.5 mm al quale sono agganciati dispositivi di calata delle singole cariche (Figura 3.4). Il cavo del circuito è supportato e guidato da piloni tubolari di acciaio di altezza compresa tra i 4 e i 12 m che possono essere trasportati con elicottero e allungati e accorciati a seconda delle necessità.

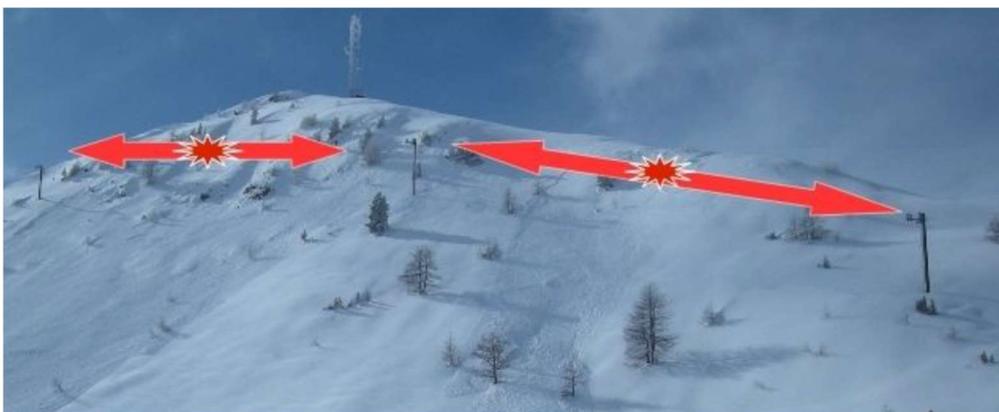


Figura 3.4 Linea del Catex sul pendio da bonificare (Bruno E. et al., 2012)

Questo sistema è stato concepito per generare delle esplosioni controllate al di sopra del manto nevoso in modo da massimizzarne il raggio d'azione. Per questo motivo, l'altezza rispetto al suolo alla quale far avvenire l'esplosione varia per ogni tiro e per questo la geometria della disposizione del cavo e dei piloni è dettata dalla morfologia del pendio stesso. Il cavo è comandato manualmente per le operazioni di manutenzione mentre è gestito da un software nella fase di posizionamento delle cariche. Il software indica quando agganciare le cariche in modo che esse siano correttamente distanziate tra loro e che occupino la corretta postazione al di sopra delle zone di potenziale distacco prescelte.

A fronte dei vantaggi che il sistema offre dal punto di vista della rapidità di esecuzione delle operazioni gestite dal software e della sicurezza degli operatori, vi sono alcuni svantaggi come la difficoltà del raggiungimento delle stazioni di comando in caso di forte maltempo. Queste sono delle postazioni dove è collocato il pilone principale con il tensionatore del cavo e gli organi motori, la piattaforma da cui vengono agganciate le cariche esplosive e il motore elettrico che attiva il movimento del cavo. A ciò si aggiungono potenziali problemi di gestione dell'esplosivo e problematiche dovute alla possibilità di blocco del cavo a causa del ghiaccio.

3.2.9 Wyssen charge dropper

È un dispositivo per il rilascio di cariche esplosive agganciato e trasportato dal cavo di un impianto a fune installato ad hoc sul pendio da bonificare. A differenza del Catex, che prevede l'aggancio di più cariche singole distanziate lungo il cavo di trasporto, il Charge Dropper trasporta contemporaneamente fino a 4 cariche da 5 kg ciascuna. Le cariche si attivano mediante accenditore a frizione nel momento in cui vengono rilasciate dal dispositivo comandato via radio per essere sospese sul pendio (*Figura 3.5*).

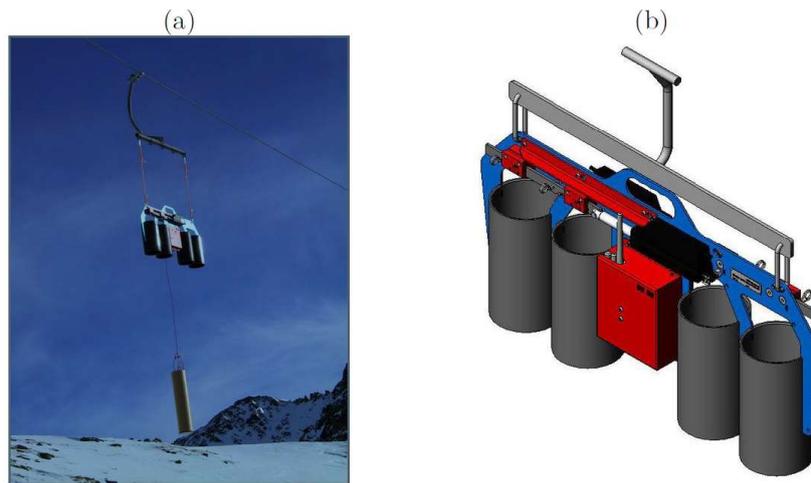


Figura 3.5 La carica sospesa al sistema trasporto/calata (a) ed un dettaglio del sistema Wyszen charge doppler (b) (wysseavalanche.com)

3.2.10 Wyszen tower

È un sistema fisso costituito da una torre metallica alta circa 8 m, posizionata nella zona che si vuole bonificare, sulla cui sommità è collocato un involucro d'acciaio per l'installazione delle cariche (Figura 3.6).



Figura 3.6 Parti funzionali del sistema Wyszen Tower (wysseavalanche.com)

Il sistema è comandato via cavo oppure via radio e può accogliere fino a 12 cariche da 2-5 kg di dinamite. Le cariche vengono collocate in un container che viene agganciato tramite elicottero sulla sommità della torre. Il container si aggancia grazie ad un meccanismo automatico che attiva le connessioni elettroniche solo nel momento in cui l'aggancio è avvenuto correttamente. Durante lo sgancio la carica viene attivata da due accenditori pirotecnici a frizione che a loro volta innescano una miccia a lenta combustione contenuta nella carica. La carica rimane appesa alla torre mediante una fune che permette di ottenere l'esplosione all'altezza desiderata sopra il manto nevoso. In Italia anche questa metodologia non è consentita dalla legge.

3.3 Sistemi con miscele gassose esplosive

3.3.1 Premessa

Data la persistenza di restrizioni legislative circa l'uso, lo stoccaggio e la manipolazione di esplosivo tradizionale, nel tempo si è sviluppato un metodo alternativo consistente nell'utilizzo di miscele esplosive di gas.

Questi sistemi si basano sull'utilizzo di una miscela, in genere di due gas, di cui uno ha la funzione di combustibile e l'altro di comburente, collocata all'interno di un contenitore, che viene fatta esplodere a comando e controllata ad opportuna distanza.

Il meccanismo consiste in una esplosione che avviene a seguito di una reazione chimica di combustione del gas attraverso un meccanismo di rilascio di energia. Perché si possa avere l'esplosione di una nube di vapori è necessario che una consistente quantità di gas infiammabile venga dispersa in atmosfera senza trovare un innesco immediato. In questo caso, la nube può disperdersi e quindi creare una quantità significativa di miscela gas-aria con concentrazione interna ai limiti di infiammabilità. La necessità di concentrazione interna ai limiti di infiammabilità, perché si generi un'esplosione, si comprende considerando il

meccanismo con cui una fiamma che si propaga in una miscela infiammabile può generare un'onda di pressione. Tale meccanismo è analogo, a scopo esemplificativo, a quello di un pistone che accelera. In *Figura 3.7* si considera l'analogia tra quest'ultimo e un tubo riempito di miscela infiammabile innescata ad un'estremità.

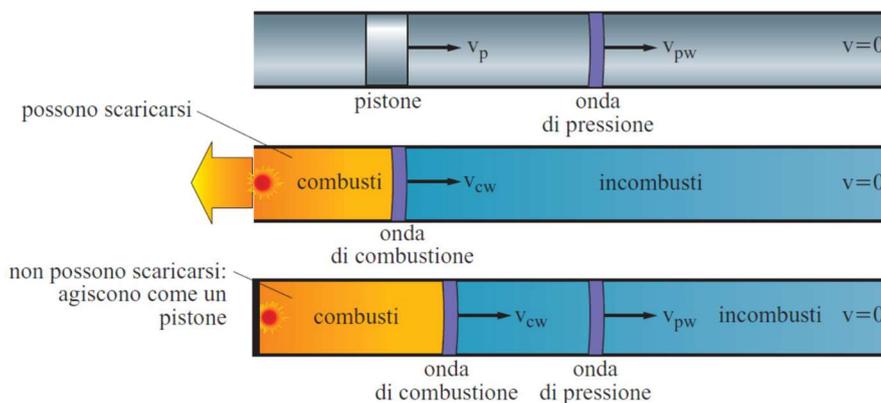


Figura 3.7 Propagazione di un'onda di combustione in una tubazione: v_p è la velocità del pistone, v_{pw} la velocità dell'onda di pressione e v_{cw} è la velocità dell'onda di combustione (Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa, Progetto strategico "RISKMAT", 2012)

Se la tubazione è aperta su entrambi i lati, i gas combustibili, avendo una densità molto minore (dato che si trovano ad una temperatura maggiore) rispetto a quelli incombustibili, si espandono e si scaricano dall'apertura vicino al punto di innesco. L'onda di combustione si propaga dunque nei gas incombustibili in quiete con una velocità caratteristica della miscela infiammabile in questione. Se invece il tubo è chiuso all'estremità vicina al punto d'innesco, i gas combustibili che si espandono non possono scaricarsi e di conseguenza si spostano verso i gas incombustibili, che vengono quindi messi in movimento. L'espansione dei gas combustibili si comporta in modo analogo a un pistone che spinge i gas incombustibili e genera un'onda di pressione.

Dal punto di vista della sicurezza tale pratica è preferita rispetto all'uso di esplosivi perché i gas sono innocui fintanto che sono separati nelle loro bombole e dunque garantiscono trasporto e stoccaggio più sicuro. Ulteriori vantaggi, rispetto all'uso degli esplosivi di tipo tradizionale, sono rappresentati dal fatto che, in caso di colpo inesplosivo, i gas si disperdono

in breve tempo nell'atmosfera, neutralizzando rapidamente il pericolo dovuto all'esplosione accidentale di gas incombusto [7].

3.3.2 Gazex

È un sistema costituito da un esploditore di fattura simile ad un cannone nel quale viene fatta detonare in modo controllato una miscela di ossigeno e propano. L'estremità dell'esploditore è direzionata verso il pendio da bonificare e contiene il sistema di accensione della miscela gassosa (*Figura 3.8*).

Gli esploditori sono costituiti da un fusto e da una curva a gomito in acciaio protetti da una spessa zincatura e sono disponibili in differenti volumi e modelli. In particolare si differenziano in:

- Esploditori standard: sono adatti ad una installazione fissa e dunque ad una tipologia di terreno che ne possa garantire la collocazione e sono disponibili nei volumi 1.5, 3 e 4.5 m³;
- Esploditori a inerzia: ammortizzano gli effetti dell'esplosione grazie a un contrappeso mobile e dunque non sono vincolati alla tipologia di terreno su cui vengono collocati. Sono disponibili nei volumi 0.8, 1.5 e 3 m³;
- Esploditori Gazflex: dispone di due molle laterali per la dissipazione dell'onda d'urto al suolo. Tale sistema permette inoltre di adattarsi facilmente alle caratteristiche morfologiche dei vari siti dato che non richiede complicate perforazioni per l'installazione delle barre standard (*Figura 3.9*).

Tutti i modelli di esploditore sono collegati, tramite tubazioni in polietilene o acciaio, a un deposito (*Figura 3.10*) in cui sono stoccate le bombole contenenti l'ossigeno e il propano, in quantità sufficienti a soddisfare il fabbisogno della stagione invernale. Il deposito può servire fino a 10 esploditori collocati entro un raggio di 500 m.

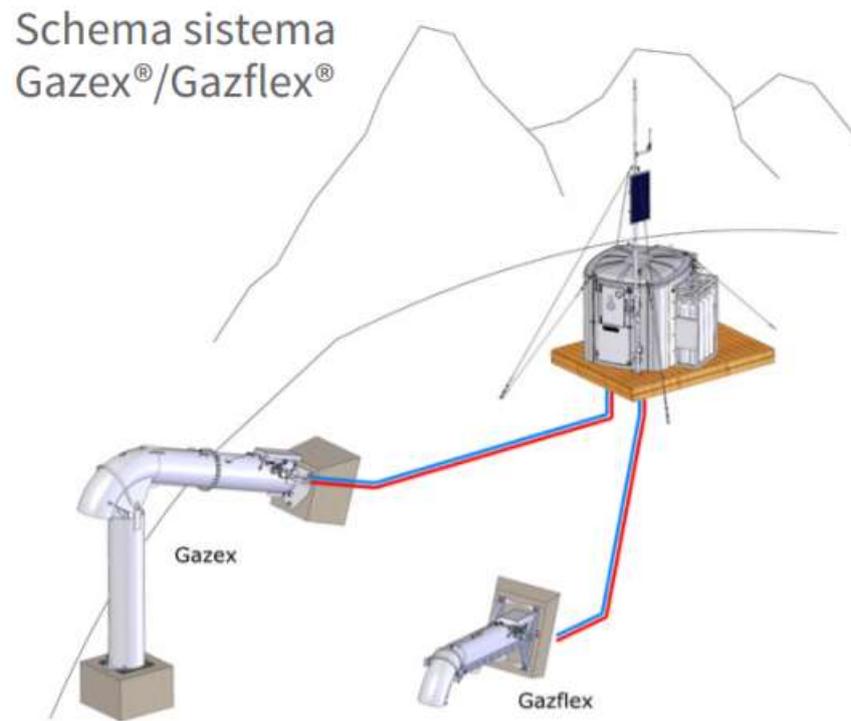


Figura 3.8 Schema sistema Gazex/Gazflex (tas.fr)



Figura 3.9 Sistema Gazflex (tas.fr)



Figura 3.10 Deposito bombole di ossigeno e propano (tas.fr)

Il vantaggi del sistema Gazex sono i seguenti:

- Il sistema funziona in modo ottimale in qualsiasi condizione atmosferica garantendo una rapida reazione ad una situazione di pericolo che richieda un distacco preventivo;
- Il sistema è azionato e comandato a distanza tramite un comando a cavo, un radiocomando o GMS in modo da garantire la totale sicurezza per gli operatori;
- Necessità di raggiungere i cannoni e il deposito solamente una volta a stagione per il rifornimento di gas;
- Efficacia maggiore o uguale a quella che si ottiene facendo esplodere in aria una carica di potenza uguale a quella del volume di gas installato;
- Nessun problema legato al recupero della carica in caso di fallimento del tiro e rapida dispersione dei gas in atmosfera;
- Opportunità di investimento economico graduale data la possibilità di controllare fino a dieci esploditori e costi di gestione contenuti.

Vi sono, tuttavia, anche alcuni svantaggi:

- Per motivi di sicurezza, la procedura di tiro è bloccata da diversi codici di accesso e di norma il tempo di attivazione di un esploditore è di circa due minuti;
- L'installazione di tali sistemi comporta uno sgradevole impatto ambientale e visivo dal punto di vista paesaggistico;
- Possibilità di vincolare l'onda di pressione generata dalla detonazione solamente nella direzione dettata dalla bocca del cannone e conseguente necessità di dover smontare e sostituire il sistema in caso di non sufficiente potenza o scorretto direzionamento.

3.3.3 Avalhex

È un sistema di distacco artificiale basato sull'esplosione di una miscela di ossigeno e idrogeno che avviene all'interno di un pallone di lattice sospeso ad una certa quota dal manto nevoso (*Figura 3.11*). Il sistema è costituito da un esploditore collocato nella zona di interesse per la bonifica che genera l'onda d'urto e da un sistema elettronico di attivazione e di controllo gestito in loco oppure in remoto via radio. L'esplosione della miscela genera una sovrappressione che raggiunge i 30 kPa ad una distanza di 30 m dal punto di esplosione con un effetto omnidirezionale intorno all'esploditore. L'onda d'urto sferica è dunque in grado di causare la rottura degli strati deboli del manto nevoso a distanze di 30-40 m dal punto in cui è collocato pallone (*Figura 3.12*).



Figura 3.11 Sistema Avalhex con un pallone pronto per la detonazione (Bruno E. et al., 2012)



Figura 3.12 Esplosione della miscela gassosa in un pallone del sistema Avalhex (Bruno E. et al., 2012)

Il sistema prevede all'interno del deposito il solo stoccaggio dell'idrogeno, in quanto l'ossigeno viene direttamente prelevato dall'atmosfera ed è convogliato all'interno del pallone alla base del contenitore attraverso un tubo Venturi. L'idrogeno è invece facilmente reperibile sul mercato e facilmente trasportabile e stoccabile, data la sua leggerezza e la sua sicurezza, in quanto si disperde rapidamente in atmosfera in caso di accidentali fuoriuscite.

Il rigonfiamento dei palloni avviene in seguito all'attivazione a distanza di una valvola che eroga nel pallone l'idrogeno miscelandolo con l'ossigeno. Terminata l'erogazione del gas all'interno del pallone, un accenditore elettrico posizionato nel pallone stesso innesca l'esplosione.

Il sistema Avalhex è realizzato per eseguire sia esplosioni detonanti che deflagranti. Nel primo caso si hanno velocità di detonazione di circa 1900 m/s in seguito ad una erogazione di gas della durata di 120 s, mentre nel secondo si raggiungono velocità di esplosione leggermente inferiori alla velocità del suono in seguito ad una erogazione di gas di 90 secondi. In funzione delle necessità in fase di progettazione del distacco, si opta per una o per l'altra modalità a seconda che sia richiesta un'esplosione con elevato contenuto energetico oppure sollecitazioni più deboli sul manto nevoso ma prolungate nel tempo.

3.3.4 Daisybell

Il Daisybell è un sistema a gas elitrasmportato composto da un cono in acciaio dentro il quale viene fatta esplodere una miscela di idrogeno e ossigeno. Questo sistema viene trasportato in loco mediante elicottero (*Figura 3.13*) con un sistema antivibrazione per le bombole di gas, una di ossigeno e due di idrogeno, e una volta raggiunta la zona di distacco, innesca la detonazione sopra il manto nevoso instabile (*Figura 3.14*). Il sistema, a forma di campana conica, è collocato sotto l'elicottero ad una distanza che varia tra i 10 e i 20 m in funzione delle esigenze e delle caratteristiche del pendio da bonificare. Mantenendo la campana a tale distanza, si evitano le interferenze generate dalle turbolenze del rotore sull'invio del gas e sull'esplosione e quelle dovute a condizioni atmosferiche non ottimali, come la presenza di vento. Il sistema inoltre presenta due candele nella parte sommitale del cono per l'innesco dell'esplosione e delle valvole di non ritorno che impediscono all'esplosione di rientrare verso le riserve di gas.



Figura 3.13 Sistema Daisybell collegato al gancio baricentrico dell'elicottero (elitellina.com)



Figura 3.14 L'esplosione della miscela gassosa nella campana del sistema Daisybell (Bruno E. et al., 2012)

L'innesco e la gestione del sistema sono effettuati tramite onde radio da un quadro elettrico trasportabile gestito da un operatore a bordo dell'elicottero. Un apposito software inoltre monitora tutti i parametri di funzionamento del Daisybell in modo da consentire le procedure di innesco, una volta che tutti i parametri hanno raggiunto il valore ottimale. Tra questi il più significativo è proprio la distanza tra il fondo della campana e la superficie del manto nevoso che viene gestita tramite un sistema di lettura e che deve essere idonea a garantire una prestazione di tiro ottimale. Le esperienze sull'utilizzo di questo sistema hanno messo alla luce che la distanza ideale di scoppio è compresa tra i 3 e i 10 m dal suolo in funzione, come già visto, della morfologia del territorio e della tipologia di manto nevoso. Le sperimentazioni in campo hanno mostrato maggiore efficacia, per lastroni di neve soffici, dello scoppio ad una distanza maggiore dal suolo e viceversa per lastroni duri. Questo effetto è probabilmente dovuto alla minore resistenza flessionale del lastrone soffice che dunque consentirebbe l'innesco del collasso dello strato a debole coesione già con una sollecitazione bassa. In questo modo risulterebbe più efficace sfruttare l'energia generata dall'esplosione per sollecitare il lastrone con una sovrappressione minore ma distribuita su una superficie maggiore, aumentando così la probabilità di propagazione del collasso dello strato a debole coesione [9]. Per quanto riguarda il raggio d'azione, è invece emerso che il

sistema genera una sovrappressione di 80/90 mbar al suolo fino ad una distanza di 12 m dal punto di scoppio raggiungendo efficienze simili a quelle del Gazex da 0.8 m³. La differenza tra i due sistemi consta nella durata dell'esplosione, che per il Daisybell è molto minore.

Tra i vantaggi garantiti dall'utilizzo della Daisybell si annoverano: la semplicità di funzionamento, la rapidità di intervento, l'efficacia, la mobilità, l'autonomia e l'economicità. Per contro, si segnala lo svantaggio dell'utilizzo, possibile solo in caso di meteo idoneo al volo dell'elicottero. Per questo motivo il Daisybell si è rivelato un sistema di distacco complementare a quelli fissi e idoneo nei casi che non sono mai stati monitorati o risolti prima con altri mezzi.

3.3.5 O'bellx

Si tratta di un sistema di distacco artificiale fisso che sfrutta l'esplosione di una miscela di idrogeno e ossigeno con differente tecnica di innesco e di tiro rispetto al Daisybell. L'O'bellx infatti è costituito da un modulo funzionale conico in acciaio che contiene la miscela sorretto da un palo inclinato, anch'esso in acciaio, vincolato al terreno da barre di ancoraggio (Figura 3.15).



Figura 3.15 Sistema O'bellx (ekuonews.it)

Le velocità di esplosione superano i 2000 m/s con generazione di sovrapressioni al suolo di 300 mbar in corrispondenza del punto di scoppio. Essendo un sistema fisso, la sua operatività è indipendente dalle condizioni metereologiche. Il suo utilizzo inoltre è vantaggioso in quanto garantisce un'autonomia fino a 60 esplosioni, oltre a un'elevata sicurezza, in quanto non richiede l'intervento umano a terra nelle operazioni di recupero e manutenzione. Il modulo funzionale del sistema infatti è mobile ed elitrasportabile, e le fasi di aggancio e sgancio possono essere gestite direttamente dal velivolo (*Figura 3.16*). Infine, è significativo segnalare il design molto meno impattante esteticamente rispetto al Gazex.



Figura 3.16 Posa del sistema O'bellx sul pendio tramite elicottero

3.3.6 APR Sniper

La maggior parte dei sistemi finora elencati ha messo in luce la necessità del trasporto dell'esplosivo o della miscela esplosiva sul punto di tiro da parte di personale addetto. Questa operazione, per quanto eseguita correttamente, comporta non pochi rischi per gli operatori addetti alla manipolazione di tali materiali: su tale punto si è sviluppato il sistema SNIPER per APR (aeromobile a pilotaggio da remoto). Tale sistema prevede l'utilizzo di un

drone che viene gestito, lontano dal punto di tiro, dagli operatori incaricati alla bonifica del sito in modo da monitorare l'andamento dell'operazione in totale sicurezza (Figura 3.17). L'impiego del drone è più vantaggioso rispetto a quello dell'elicottero, in quanto è più versatile e di più veloce esecuzione, permettendo di eseguire più interventi in diversi punti e in meno tempo. L'esplosivo utilizzato è una carica deflagrante denominata SNP 25 composta da polvere pirica che viene collocata grazie ad un apposito supporto all'interno del drone e da questo facilmente trasportata grazie al suo peso di circa 2.3 kg.



Figura 3.17 Sistema APR Sniper (snipertechnology.it)

3.4 Scelta del sistema ottimale

Dalla descrizione dei sistemi per l'innesco artificiale di valanghe nevose emerge come non vi sia un metodo da considerare migliore degli altri in assoluto: la scelta va attentamente valutata sulla base delle caratteristiche del sito da bonificare, sulle possibilità di trasporto in loco e sul contesto economico e normativo in cui si è costretti a lavorare.

Il distacco artificiale di valanghe è un meccanismo molto complicato in cui hanno un ruolo fondamentale molte variabili tecniche e fisiche, come ad esempio l'energia d'esplosione, il

posizionamento della carica e le proprietà del manto nevoso e del suolo. Spesso lo stesso meccanismo che provoca il distacco non è ben noto. Ovviamente è noto il fatto che per l'innescamento del fenomeno valanghivo sia necessario lo sviluppo di una sovrappressione sul manto nevoso, ma non è facile valutare interamente i meccanismi alla base della fratturazione e del collasso del manto nevoso (Takashi et al., 2008).

4 Capitolo 4. Interazioni neve-esplosivo

4.1 Premessa

Per la buona riuscita di un'operazione di bonifica di un pendio è di fondamentale importanza studiare le possibili interazioni tra neve ed esplosivo e focalizzarsi anche sul fatto che gli effetti indotti da una carica sulla neve non sono direttamente proporzionali alla massa di esplosivo contenuto nella stessa. Non è matematico che 2 kg di esplosivo creino un effetto pari al doppio di quello generato con una carica da 1kg ma anzi tutto è funzione delle condizioni in cui si opera: altitudine, temperatura, umidità dell'aria, morfologia e topografia dell'area.

4.2 Trasmissione dell'onda d'urto

Considerando una esplosione in aria, 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 dal centro dell'esplosione attraversando materiali differenti come schematizzato in *Figura 4.1*. La sfericità di una carica è definita dal soddisfacimento della relazione lunghezza/diametro ≤ 6 .

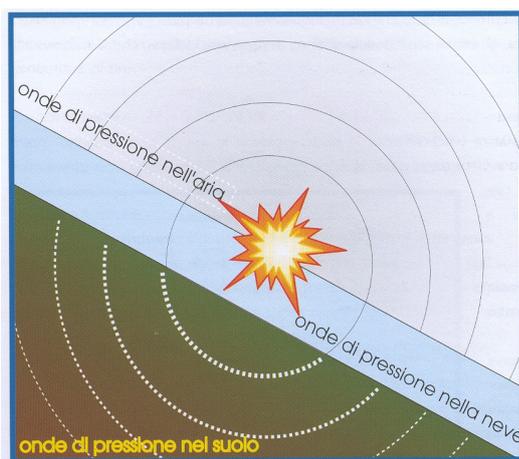


Figura 4.1 Distribuzione delle onde di pressione in seguito al brillamento di una carica sferica (Cresta R., 2002)

In particolare, si osserva che l'onda d'urto, si trasmette all'interno di tre diversi materiali, che, avendo differenti caratteristiche meccaniche, ne condizionano la propagazione.

Nel dettaglio si osserva:

- Propagazione nella neve: si nota una grande variabilità della velocità di propagazione delle onde di compressione o onde p (da 350 a 3000 m/s) a causa della eterogeneità del manto nevoso. Le onde p infatti si trasmettono a grande velocità nella neve compatta e metamorfosata e a bassa velocità nella neve fresca. La velocità di propagazione è allora funzione del tenore di acqua interstiziale e dell'indice dei vuoti, il quale, se è elevato, comporta dissipazione e rallentamento della propagazione delle onde.
- Propagazione nell'aria: le onde p, che sono le uniche a propagarsi (essendo l'aria un fluido), si diffondono sfericamente dal punto di scoppio della carica con una dissipazione, però, piuttosto rapida.
- Propagazione nel suolo: è funzione della propagazione all'interno dello strato sovrastante e dunque della tipologia di neve che costituisce il manto nevoso. Inoltre, un suolo vegetale o non coesivo tende a smorzare la trasmissione delle onde che invece è intensificata da suoli rocciosi e poco fratturati.

4.2.1 Influenza dell'impedenza sulla trasmissione delle onde

L'onda d'urto, così come il suono, è un fenomeno di propagazione all'interno di un mezzo. Il parametro che ha maggiore influenza nei meccanismi di trasmissione di sollecitazioni tra mezzi con caratteristiche meccaniche differenti è l'impedenza. L'impedenza Z di un mezzo è funzione della sua densità ρ_0 e della velocità di propagazione delle vibrazioni in quel mezzo V secondo la 4.1:

$$Z = \rho_0 \cdot V \quad (4.1)$$

Considerando ora le pressioni relative alla propagazione delle vibrazioni all'interno dei differenti mezzi (P), queste sono legate tramite l'impedenza alla velocità delle particelle appena colpite dal fronte d'onda (v) secondo la 4.2:

$$P = Z \cdot v = \rho_0 \cdot V \cdot v \quad (4.2)$$

Se ne deduce che, in neve, a parità v , essendo l'impedenza maggiore di quella dell'aria, le pressioni sono maggiori nella prima piuttosto che nella seconda.

Queste pressioni manifestano un decadimento nel tempo che può essere ben descritto da una legge di tipo esponenziale come la 4.3 e qualitativamente rappresentato dal grafico in *Figura 4.2*.

$$P(t) = P_{\max} e^{-t/\tau} \quad (4.3)$$

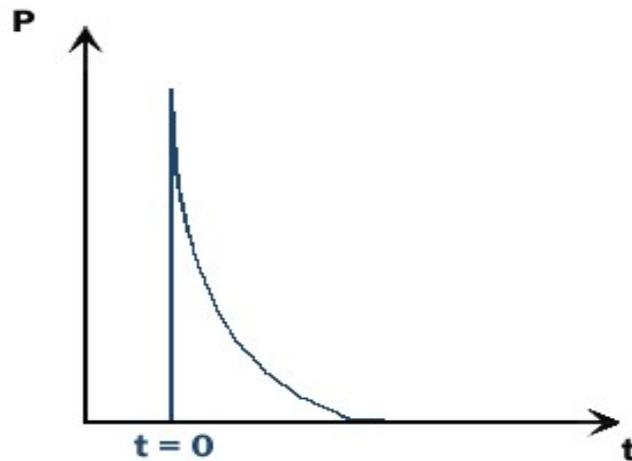


Figura 4.2 Curva di decadimento delle pressioni in seguito alla detonazione (Cresta, 2002)

Nella 4.3 P_{\max} è il valore della pressione di picco e τ è una costante temporale che descrive il tempo necessario perché la pressione decada a circa 1/3 del valore della pressione di picco.

Il grafico in *Figura 4.2* è del tutto qualitativo ma rappresenta il fenomeno in modo valido per qualsiasi mezzo qualora questo sia unico ed omogeneo per tutta la sua estensione.

L'attenuazione dell'onda di pressione è, in casi reali, funzione di fenomeni di riflessione e rifrazione che si manifestano all'interfaccia tra i mezzi e che ne modificano consistentemente il fenomeno.

Generalmente però si osservano le seguenti situazioni:

- La velocità dell'onda aumenta passando dall'aria, al manto nevoso e poi al suolo.
- Più uno strato è veloce e maggiore sarà il suo effetto di mascheramento sugli strati sottostanti se questi sono più lenti.
- È sufficiente una sovrappressione di 30 mbar per sollecitare gli strati deboli del manto nevoso se non si tengono in considerazione lo spessore del manto nevoso, la forma dei suoi grani e la sua densità.

4.3 Effetti del posizionamento della carica

La neve, a causa della sua struttura, risulta avere un effetto assorbente e smorzante. Spesso quasi tutta l'energia trasmessa dall'esplosione viene 'assorbita' dalla neve portando come unico risultato la formazione di crateri di modeste dimensioni. Per questo motivo è di fondamentale importanza lo studio della propagazione dell'onda nei tre mezzi e le diverse risposte che si possono avere.

4.3.1 Teoria del cratere

Allo scopo di comprendere meglio le considerazioni che si faranno in seguito si ritiene opportuno riassumere gli studi effettuati da Livingston nel 1956 [10]. Le sue sperimentazioni sono state realizzate in roccia e non in neve ed hanno messo in luce, come espresso nella 4.4, l'esistenza di un fattore di proporzionalità tra la profondità critica della carica e la radice cubica della massa di esplosivo:

$$N = E \cdot \sqrt[3]{W} \quad (4.4)$$

All'interno di questa:

- N è la profondità critica della carica: la massima profondità di collocazione della carica a partire dalla quale è possibile osservare in superficie segni visibili di disturbo della neve in seguito al brillamento;
- E rappresenta la costante di proporzionalità critica: differisce per ogni coppia roccia-esplosivo;
- W è la massa dell'esplosivo.

La 4.4 può essere riscritta per una generica profondità della carica inserendo un coefficiente adimensionale come riportato nella seguente formula:

$$d_c = \Delta E \sqrt[3]{W} \quad (4.5)$$

In cui:

- d_c è la distanza del baricentro della carica dalla superficie;
- Δ è la relazione di profondità, definita come $\frac{d_c}{N}$.

Gli studi di Livingston hanno come ipotesi basilare la sfericità della carica, pertanto, come già detto, rimangono validi solo per cariche che hanno una lunghezza inferiore a 6 volte il diametro.

4.3.2 Esplosione della carica all'interno del manto nevoso

Il brillamento della carica all'interno della neve causa un immediato e significativo cambio di pressione nei punti limitrofi al centro dell'esplosione. Questo fenomeno è dovuto allo sviluppo di gas ad elevatissime temperature in seguito all'esplosione.

La neve risulterà vaporizzata nelle immediate vicinanze del centro dell'esplosione per manifestare fenomeni di frantumazione a distanze maggiori. Il risultato finale sarà un cratere dai bordi rialzati e con il caratteristico profilo riportato in *Figura 4.3*.

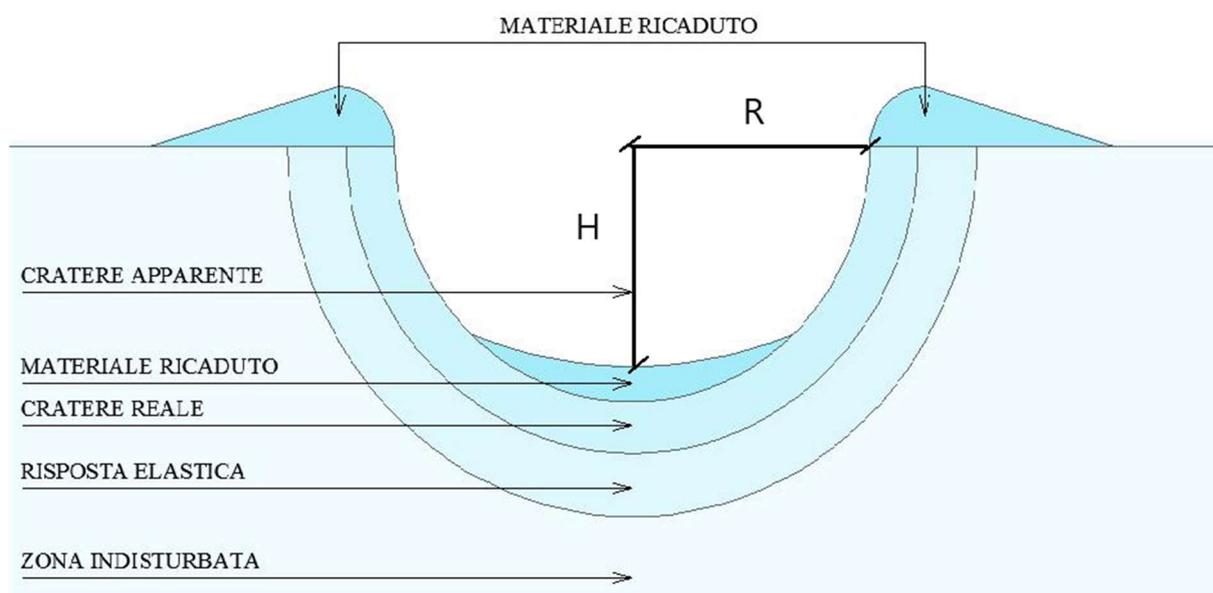


Figura 4.3 Schema del cratere conseguente ad un'esplosione (Gorret E., 2014)

In *Figura 4.3*, oltre ai parametri raggio del cratere R e profondità del cratere H , si nota la nomenclatura delle parti che lo costituiscono:

- Cratere apparente: quello che appare immediatamente dopo l'esplosione;
- Cratere reale: quello che si nota in seguito alla rimozione del materiale smosso dall'esplosione e ricaduto all'interno del cratere. Alcuni confronti (Corps of Engineer, 1961) [11] hanno messo in luce che il raggio del cratere reale è dal 10 al 20 % circa

più grande di quello apparente, a seconda del posizionamento della carica e delle caratteristiche fisiche del materiale;

- Materiale ricaduto: materiale sollevato dalla sua posizione originaria in seguito all'esplosione e ricaduto all'interno del cratere;
- Zona indisturbata: zona che non ha risentito degli effetti dell'esplosione.

In conclusione, dunque il cratere si forma ad una profondità ottimale, da verificare con tiri di prova. Se la profondità della carica è eccessiva si verifica il cosiddetto effetto "fumacchio" per cui non si manifestano in superficie effetti dovuti all'esplosione della carica. Al contrario, nel caso in cui la profondità sia troppo limitata, si avrà un effetto di "air blast" con proiezioni e riduzione delle dimensioni del cratere stesso. Alla profondità critica si osserva in superficie un rigonfiamento. Volendo ottenere un cratere sarà allora necessario ridurre tale profondità.

Le esperienze di numerosi ricercatori [12] hanno portato alla definizione di formule empiriche per la determinazione delle dimensioni dei crateri in funzione della quantità di esplosivo impiegato (W , massa) e della profondità a cui è collocato il baricentro della carica (H):

$$H = 0.75 \cdot \sqrt[3]{W} \quad (4.6)$$

$$H = 1.50 \cdot \sqrt[3]{W} \quad (4.7)$$

La 4.6 fa riferimento al cratere massimo, mentre la 4.7 fa riferimento alla profondità di affondamento della carica tale per cui si ottiene il fenomeno del fumacchio.

L'esplosione della carica all'interno del manto nevoso fornisce delle percentuali di successo molto basse (< 10 %). A causa delle scarse caratteristiche meccaniche della neve l'onda

d'urto si propaga a breve distanza e generalmente produce deformazioni del manto localizzate e crateri di piccole dimensioni.

4.3.3 Esplosione della carica sulla superficie del manto nevoso

A parità di carica, un tiro in superficie può interessare un'area molto maggiore rispetto ad un tiro in profondità. Partendo dalla conoscenza per cui il transito di uno sciatore sia sufficiente a provocare il distacco di una valanga, ovvero una pressione pari a circa 30 mbar/cm^2 , Mellor (USA) [13] arrivò a redigere 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 (*Figura 4.4*).

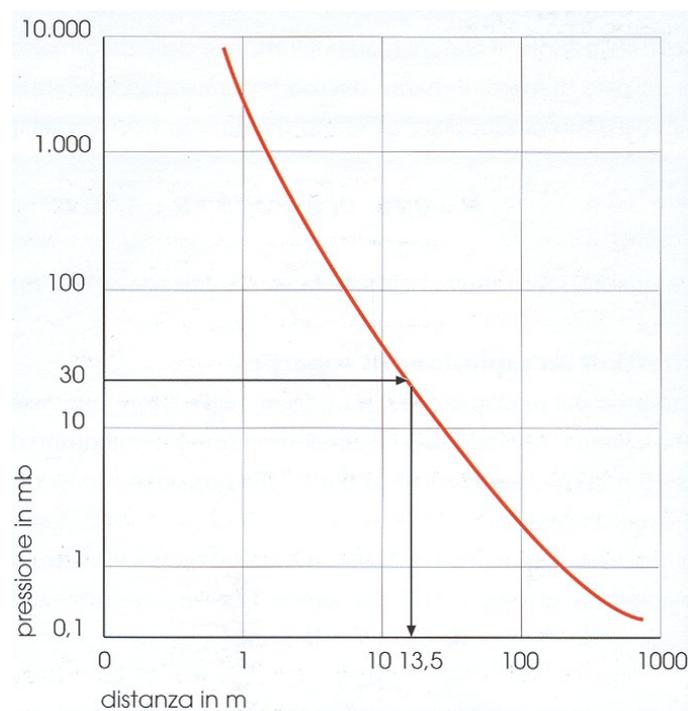


Figura 4.4 Grafico di Mellor (Cresta R., 2002)

Dal grafico di *Figura 4.4* si evince come la distanza massima alla quale una carica sferica di 1 kg di TNT in campo libero, genera una pressione pari a 30 mbar/cm^2 , è pari a 13,5 m.

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

La relazione ricavata da Mellor per valutare il raggio efficace di una carica posta sulla superficie del manto nevoso è riportata nella seguente equazione:

$$R = 13.5 \cdot \sqrt[3]{W} \quad (4.8)$$

Dalla 4.8 si nota come per ottenere un raggio di influenza doppio sia necessario elevare al cubo il peso della carica utilizzata.

La detonazione sulla superficie del manto nevoso garantisce una percentuale di successo medio-alta (circa 50-60 %). Si manifestano delle deformazioni localizzate della struttura del manto nevoso ma pur sempre minori rispetto a quelle che conseguono ad un'esplosione in aria.

4.3.4 Esplosione della carica in aria

Come precedentemente osservato, in aria il fenomeno prevalente è quello di una rapida dissipazione dell'onda di pressione sferica. Basti pensare che il valore di pressione alla distanza di 2 m dal punto di scoppio si riduce di 250-300 volte rispetto al valore misurato nel punto di scoppio stesso. L'onda d'urto generata in aria si riflette sul suolo con sviluppo di un'onda retrograda a cui si sovrappongono treni d'onda secondari conseguenti alla riflessione dell'onda d'urto.

A parità di carica, l'aumento di pressione che si registra sulla superficie della neve varia in funzione dell'altezza da cui si esegue il tiro ed è stato sperimentalmente osservato (Mach) [8] che la pressione aumenta proporzionalmente a tale altezza fino a 2 m, per poi ridursi per quote superiori fino al raggiungimento di un valore nullo.

In letteratura (Froböse,1969) [8], a seconda della modalità con cui l'onda d'urto interagisce con il mezzo in cui si vuole realizzare il distacco, si parla di pressione statica e di pressione dinamica. La pressione statica (P_1 in *Figura 4.5*) è dovuta alla propagazione dell'onda parallelamente alla superficie e la pressione dinamica (P_2 in *Figura 4.5*) è dovuta all'incidenza perpendicolare dell'onda sulla superficie del manto. In aria la pressione statica è sempre maggiore di quella dinamica.

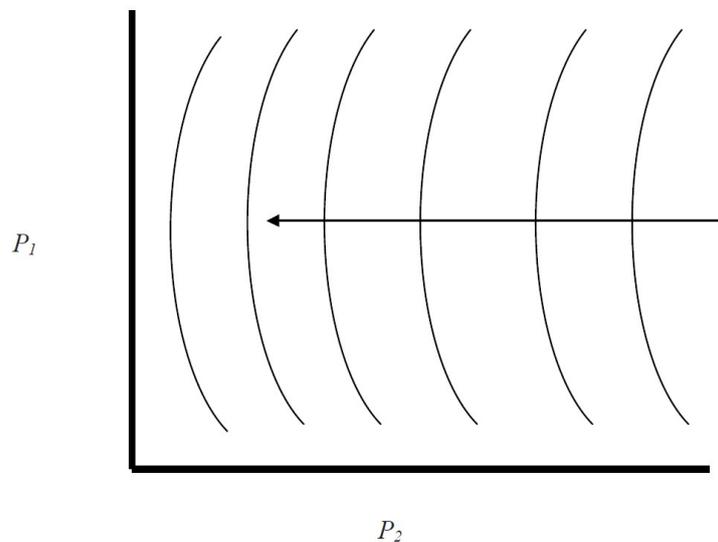


Figura 4.5 Pressione statica P_1 e pressione dinamica P_2 (Chiaravalloti, 2006)

Realizzando esplosioni in aria solitamente si ottengono delle elevate probabilità di successo (generalmente > 90 %). Le vibrazioni che si propagano in aria raggiungono infatti abbastanza facilmente la superficie del manto nevoso come onde di pressione capaci di movimentare i cristalli e dunque di rompere le resistenze degli strati deboli. La difficoltà maggiore di questa configurazione risiede nel posizionamento in sospensione della carica alla quota ottimale di tiro. La distanza infatti della carica dal suolo deve essere minore o uguale al raggio efficace della carica, ovvero il raggio della superficie circolare interessata da un valore di pressione tale da vincere la resistenza del manto nevoso.

4.4 Utilizzo ottimale della carica

La scelta del miglior posizionamento della carica è studiata nell'ottica di ottimizzare l'effetto dell'esplosione minimizzando il quantitativo di esplosivo necessario. Nel seguito, dopo le esigenze circa il confezionamento delle cariche, verranno riprese nozioni esposte in precedenza circa le caratteristiche del manto nevoso e i suoi metamorfismi nonché i possibili meccanismi di rottura degli strati deboli e le caratteristiche degli esplosivi utilizzati, per giungere a descrivere un utilizzo ottimale delle cariche stesse.

4.4.1 Confezionamento delle cariche

Al fine dell'ottenimento di una prestazione ottimale e della realizzazione delle operazioni di bonifica in sicurezza è necessario che il confezionamento delle cariche rispetti alcune esigenze:

- L'involucro della carica deve essere tale da non permettere lo scivolamento di questa sul pendio, con conseguente spostamento fuori dalla zona di interesse per quanto riguarda il distacco. A tale scopo spesso si ricorre al rivestimento dell'involucro con una retina di tessuto o di fibre vegetali;
- L'involucro della carica deve essere visibile in ogni condizione metereologica e per questo deve essere colorato con tinte fosforescenti;
- L'involucro deve riportare le caratteristiche di pericolosità delle sostanze contenute in più lingue;
- L'involucro della carica non deve avere la possibilità di produrre schegge pericolose e deve essere formato per quanto possibile da materiale biodegradabile (cartone ad esempio);
- L'esplosivo non deve produrre residui in grado di sporcare la neve;
- L'accenditore più semplice e veloce da utilizzare sul campo, specie in ambiente innevato e a basse temperature è quello a strappo;
- Dato l'obbligo per la normativa italiana di recupero delle cariche inesplose, si usa vincolare con una funicella le cariche lanciate a mano e quelle posizionate. Fanno eccezione le cariche calate da elicottero o da teleferiche che, dato l'eccessivo rischio

del recupero, vengono depositate in una zona di facile accesso e successivamente disattivate.

4.4.2 Tempistiche ottimali di tiro

Ai fini di una buona riuscita delle operazioni di bonifica risulta di fondamentale importanza la scelta del giusto tempo di intervento. I rischi di una cattiva riuscita dell'intervento persistono sia che si agisca precocemente sulla neve e sia che si agisca troppo tardivamente. Agendo su un grande spessore di neve si rischia di ottenere uno scarso risultato o peggio ancora il distacco di valanghe troppo grosse, ma allo stesso tempo, agendo precocemente, su un minore volume di neve al suolo, si possono ugualmente ottenere risultati pressoché nulli.

Nel dettaglio comunque, la scelta dell'istante ideale di tiro è funzione di più fattori. Tra questi alcuni tra i più importanti da tenere in considerazione sono i seguenti:

- Influenza delle variazioni di temperatura sulla struttura degli strati nevosi;
- Influsso del vento con generazione di eventuali accumuli;
- Umidità della neve: alti tenori di acqua possono inficiare il distacco artificiale;
- Esposizione dei pendii: generalmente, per motivi di sicurezza, si bonificano prima quelli esposti a Sud e poi quelli a Nord;
- Spessore, composizione e sviluppo degli strati di neve.

La maggiore difficoltà nell'apprezzamento della pericolosità di un determinato pendio risiede nei repentini cambi delle condizioni atmosferiche. Le condizioni maggiormente critiche e dunque che necessitano di considerazioni approfondite sono gli accumuli di neve ventata che si possono formare sia dopo che durante le precipitazioni per velocità del vento maggiori a 20 km/h e la presenza di acqua all'interno della neve. La neve generata da accumulo da vento presenta legami alquanto labili con gli strati sottostanti nonostante la sua notevole coesione mentre quella bagnata è molto difficile da staccare e per intervenire in questo scenario si deve spesso attendere che questa sia la più bagnata possibile per escludere la presenza di croste ghiacciate in grado di attenuare la propagazione dell'onda d'urto negli

strati sottostanti. Questo scenario si manifesta solitamente nel primo pomeriggio delle giornate soleggiate e in particolare tra le ore 13:00 e le 16:00.

In definitiva, gli intervalli ottimali che delineano un periodo di tempo ideale al distacco sono i seguenti:

- Spessori di neve fresca compresi tra i 20 e i 50 cm;
- Velocità del vento comprese tra 20 e 50 km/h;
- Temperature dell'aria comprese tra 0 e -10 °C.

4.4.3 Macro-aree ottimali di tiro

Il pendio, per garantire un distacco ottimale, deve soddisfare determinati requisiti di pendenza e determinate caratteristiche morfologiche in modo da consentire un'ideale propagazione dell'onda d'urto. La propagazione di questa è influenzata dallo spessore della neve in sito e dalla presenza di asperità del terreno. Per questi motivi, risultano funzionali ad un idoneo distacco i pendii con un'inclinazione compresa tra 35° e 50° e, dal punto di vista morfologico le zone a valle dei costoni di pendio e le zone del pendio con limitati spessori di neve.

La scelta della zona d'influenza migliore per il brillamento è funzione di alcune considerazioni:

- Scoppi eseguiti al di sopra del manto nevoso tendono a generare aree di influenza con raggio maggiore;
- I brillamenti realizzati per necessità all'interno del manto nevoso vanno considerati con un raggio limitato;
- È opportuno scegliere come punto di scoppio zone in cui sono presenti singolarità tensionali in modo da sollecitarle maggiormente;
- Va prestata particolare attenzione al distacco di slavine per simpatia: nella bonifica di un canale in cui ne affluiscono di più piccoli si devono prima bonificare questi e solo in seguito il canale;

- L'effetto dell'onda di pressione è molto influenzato dalla posizione della carica rispetto alla topografia e allo spessore del manto nevoso.

Per quanto riguarda l'ultima considerazione, va specificato che, nel caso si debba far scoppiare una carica all'interno del manto nevoso, conviene farlo dove lo strato di neve è più sottile come illustrato in *Figura 4.6*.

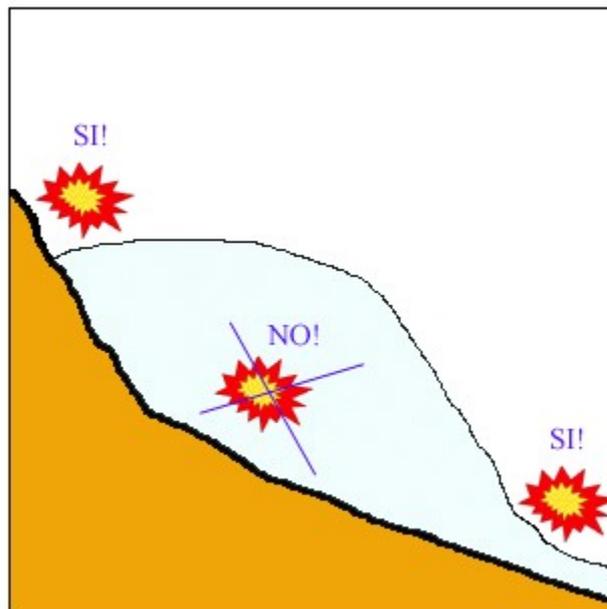


Figura 4.6 Posizionamento delle cariche nei confronti dello spessore degli strati (Chiaravalloti, 2006)

Per quanto concerne la scelta di zone con singolarità tensionale per l'innesco se ne riportano alcune nel seguito:

- Pendii convessi con coperture di neve non omogenea e conseguente creazione di tension crack nel manto nevoso
- Aree sottostanti le cornici
- Aree con affioramenti di rocce
- Aree adiacenti ad alberi

- Aree interessate da trazione nella zona sommitale e da compressione in quella al piede del pendio
- Zone di ancoraggio del manto nevoso

CASI ESEMPIO

Caso 1

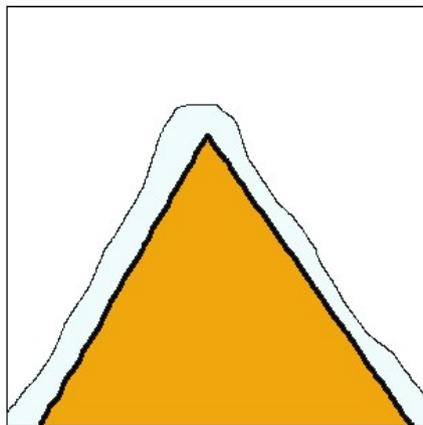


Figura 4.7 Accumulo uniforme di neve (Chiaravalloti, 2006)

Nel caso di *Figura 4.7* si notano notevoli accumuli di neve uniformi e non generati da vento. È fondamentale in questo caso constatare la coesione della neve appena caduta con il suolo o con gli strati di neve sottostanti in modo da prevenire la formazione di valanghe di fondo o di superficie. È buona norma intervenire non appena la nevicata è terminata in modo da non attendere la creazione di ulteriori accumuli nevosi che potrebbero risultare inerti all'esplosione o generare slavine di dimensioni difficilmente controllabili.

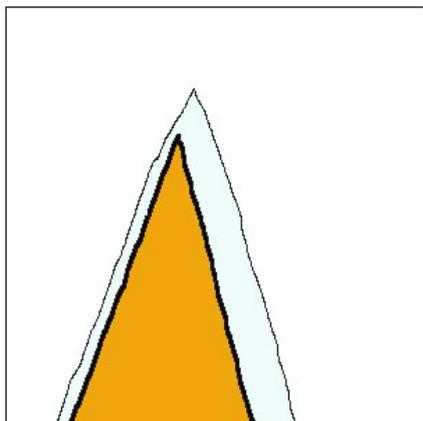
Caso 2

Figura 4.8 Accumulo irregolare di neve dovuto alla presenza di vento (Chiaravalloti, 2006)

In questo secondo caso (Figura 4.8) ci si trova di fronte ad un accumulo di neve non uniforme, più modesto sul versante di sinistra rispetto a quello di destra. Questa situazione può manifestarsi in qualsiasi periodo, sia invernale che primaverile ed è imputabile all'azione del vento, che, agendo secondo una direzione preferenziale genera accumuli notevoli in determinate zone piuttosto che in altre. Questi accumuli possono portare alla generazione di valanghe a lastroni di fondo e per questo si deve intervenire non appena si formano dei lastroni già di 30-40 cm con dei distacchi frazionati e di piccole dimensioni.

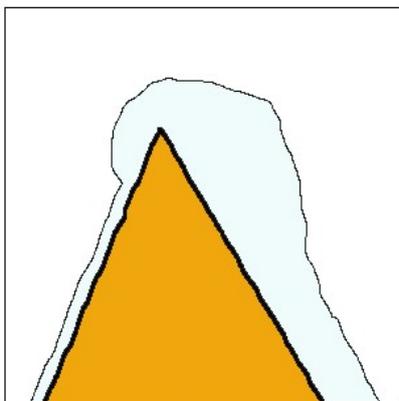
Caso 3

Figura 4.9 Deposito a bassa densità di neve (Chiaravalloti, 2006)

In *Figura 4.9* si fa riferimento ad un manto nevoso invernale a bassa densità ($40-60 \text{ kg/m}^3$) caratterizzato da un deposito in assenza di vento. In questo caso si può andare incontro alla formazione di valanghe a debole coesione e dunque si tende a realizzare molteplici interventi, dilazionati nel tempo, dopo ogni nevicata o quando l'altezza raggiunge i 40-50 cm. Per una buona riuscita della bonifica si cerca di provocare una valanga di fondo, dato lo scarso ancoraggio al suolo di questa tipologia di neve.

Caso 4

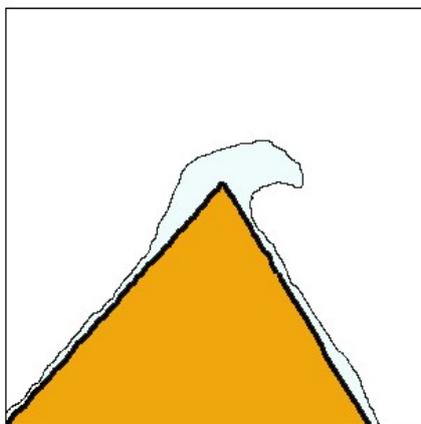


Figura 4.10 Cornice di neve ventata su linea di cresta (Chiaravalloti, 2006)

Quest'ultimo caso (*Figura 4.10*) descrive la formazione delle cornici sulle linee di cresta, strutture generate da un flusso di vento costante e agente sempre nella stessa direzione. Il tipo di neve interessato da questo fenomeno è molto metamorfosato e con valori di densità elevati (fino a 700 kg/m^3). Per prevenire il manifestarsi di crolli che possono generare l'ulteriore innesco di valanghe, si programmano interventi di distacco periodici. Per questa tipologia di interventi non si utilizza il getto di carica da elicottero data la necessità di avere un preciso posizionamento della carica e dato il rischio dell'azione del vento sulla stabilità dell'elicottero.

4.4.4 Micro-aree ottimali di tiro

In questa sezione si analizzeranno i punti ottimali per il posizionamento delle cariche a scala di pendio. Dalle considerazioni svolte in precedenza emerge che un buon risultato a livello di estensione dell'area d'influenza dell'onda d'urto si ottiene facendo scoppiare la carica in aria ad un'altezza di 1.5-2 m dalla superficie nevosa (*Figura 4.11*).

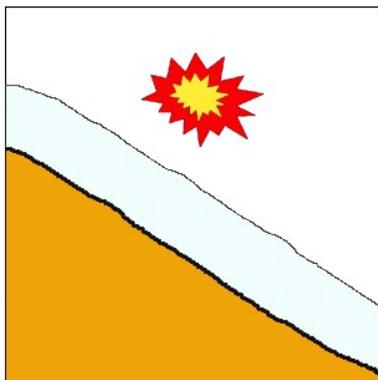


Figura 4.11 Esplosione al di sopra del pendio (McClung & Schaerer, 2000)

È inoltre opportuno prevedere lo scoppio su parti del pendio caratterizzate da una certa acclività in modo da garantire la mobilità della massa di neve destabilizzata. In caso di presenza di lastroni si tende ad intervenire nella parte sommitale (*Figura 4.12*) del pendio affinché si ottenga la propagazione della frattura perpendicolarmente alla linea di massima pendenza, al fine di garantire il distacco del lastrone.

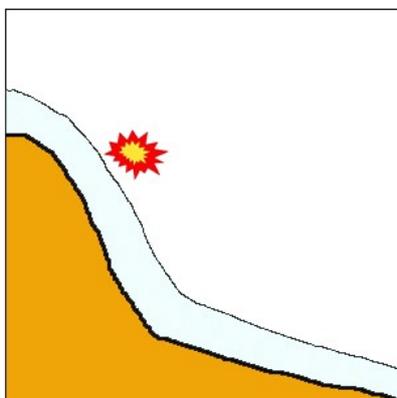


Figura 4.12 Esplosione su parti acclivi del pendio (McClung & Schaerer, 2000)

Nel caso invece ci si trovi ad operare su un pendio sottovento per staccare un grande accumulo di neve aggettante è opportuno procedere prima alla bonifica della cornice e poi alla bonifica del pendio sottostante (*Figura 4.13*). Questa tipologia di intervento può risultare piuttosto pericolosa in quanto non si è mai pienamente a conoscenza delle conseguenze del distacco.

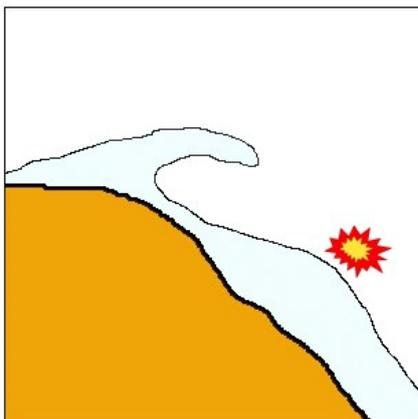


Figura 4.13 Intervento su pendio sottovento, sotto una cresta (McClung & Schaerer, 2000)

Descritti i casi di posizionamento efficace, si riportano nel seguito un paio di configurazioni da evitare per ottenere un distacco ottimale.

È da evitare la collocazione del punto di scoppio alla base di un pendio o in una zona in cui esso è poco inclinato (*Figura 4.14*). In questo caso l'operazione può risultare inefficace, in quanto la neve destabilizzata si mobilita difficilmente, essendo il suo angolo di attrito cinetico superiore a quello di inclinazione del pendio. Il miglior risultato che si può ottenere in questo caso è uno scivolamento del lastrone sovrastante avendone asportato la base di appoggio.

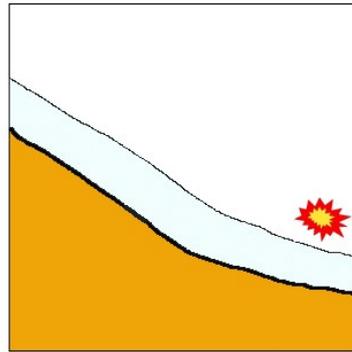


Figura 4.14 Posizionamento della carica su una zona poco inclinata del pendio (McClung & Schaerer, 2000)

Infine, si segnala come posizionamento non ottimale quello in corrispondenza di zone dove sono presenti affioramenti di rocce, siano queste legate al substrato o massi erratici (Figura 4.15). In questo caso, la non efficacia dello scoppio sarebbe causata dallo scarso volume di neve che potrebbe essere compreso tra due rocce affioranti. La roccia agirebbe infatti come interferenza per la trasmissione dell'onda d'urto all'interno del manto nevoso.

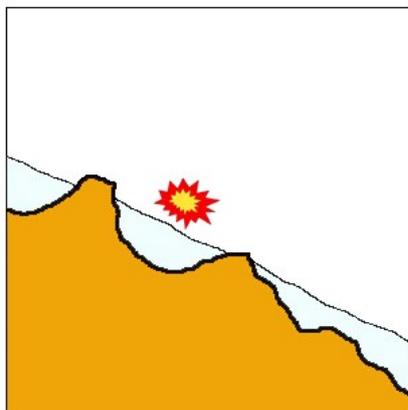


Figura 4.15 Brillamento tra le rocce (McClung & Schaerer, 2000)

5 Capitolo 5. Sperimentazioni sull'efficienza degli esplosivi

5.1 Emulsione VS dinamite

Nel corso di una campagna sperimentale sono stati testati due differenti esplosivi, una dinamite e un'emulsione. Sono state fatte detonare 24 cariche a differenti quote rispetto al manto nevoso e in particolare in quattro differenti configurazioni: sulla superficie del manto nevoso, a quote rispettivamente di 0.5 m e 1 m dalla superficie, e infine a 0.5 m di profondità dalla superficie. Dopo ogni tiro, si sono misurate le dimensioni dei crateri sviluppatisi nella neve al fine di definire il miglior accoppiamento tra la massa di esplosivo e la quota di detonazione (*Figura 5.1*).



Figura 5.1 Misure della geometria del cratere generato dall'esplosione

5.1.1 Caratteristiche del sito e degli esplosivi utilizzati

Le prove sono state realizzate in località Lago del Gabiet presso il MonterosaSki resort - Gressoney La Trinité (AO – Italia). Nel sito sperimentale il manto nevoso presentava un'altezza di circa 1 m con 30 cm di neve fresca seguita da una crosta da fusione e rigelo. A 50 cm di profondità, vi era un'alternanza di lenti di ghiaccio di spessore massimo intorno ai 5 cm; la base del manto nevoso era composta da uno strato di ghiaccio. Al di là dello strato di neve fresca di densità pari a 70 kg/m^3 , il manto nevoso presentava una densità uniforme compresa tra i 220 e i 290 kg/m^3 .

In *Tabella 5.1* si riportano le proprietà dei due esplosivi utilizzati.

Tabella 5.1 Caratteristiche tecniche principali degli esplosivi impiegati nella campagna di prove sperimentali

Tipo		Emulsione	Dinamite
Nome commerciale		Premex 3300	Goma 2 Eco
Densità	kg/m^3	1200	1450
Energia specifica ponderale	kJ/kg	3850	4100
VOD in aria libera	m/s	4900	6100
Volume dei gas	dm^3/kg	935	895
Massa unitaria	kg	0.992	0.953

5.1.2 Realizzazione del test

Sono state fatte detonare 12 cariche di dinamite e 12 cariche di emulsione con 1,2 e 3 kg di massa. La sequenza di tiro è stata basata su altezza di esplosione e massa di esplosivo: per la dinamite, le prove sono iniziate a quota - 0.5 m con una sequenza di 3 kg, 2 kg, 1 kg e così via per le altre quote (*Figura 5.2*). Per ogni tiro si sono poi misurate le dimensioni del cratere ottenuto (diametro e profondità) e le caratteristiche della neve (temperatura, densità e analisi chimiche).

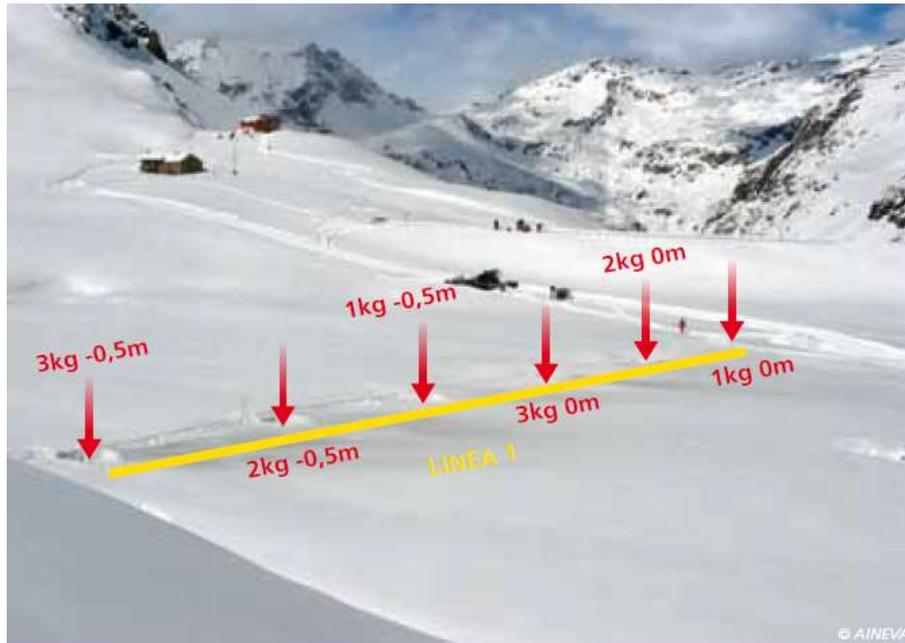


Figura 5.2 Schema di posizionamento delle cariche di Gelatina Dinamite in funzione dell'altezza di scoppio e della quantità della carica (Neve e Valanghe, AINEVA, 2011)

5.1.3 Risultati ottenuti

Per analizzare il fenomeno del cratere, il Corps of Engineers of U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (1961) [11] ha introdotto il parametro definito come posizione scalata del cratere λ_c :

$$\lambda_c = \frac{Z}{W^{1/3}} \left[\frac{ft}{lb^{1/3}} \right] \quad (5.1)$$

In cui:

- Z è la posizione della carica, sopra (+) o sotto (-) l'interfaccia neve-aria [ft]
- W è la massa della carica [lb]

I risultati di λ_c in funzione di Z per una carica di massa pari a 1 kg ricavati nella campagna sperimentale sono riportati in *Tabella 5.2*.

Tabella 5.2 Posizione scalata del cratere λ_c relativa allo scoppio di 1 kg di esplosivo (Frigo et al., 2010)

Z [m]	λ_c
-0.5	-1.26
0	0
0.5	1.26
1	2.52

In *Tabella 5.3* si osserva l'andamento di λ_c in funzione della massa della carica alla quota di -0.5 m.

Tabella 5.3 Posizione ridotta del cratere λ_c relativa allo scoppio 0.5 m al di sotto della superficie del manto nevoso (Frigo et al., 2010)

W [kg]	λ_c
1	-1.26
2	-1
3	-0.87

Nel seguito si riportano i diametri (*Figura 5.3*) e le profondità (*Figura 5.4*) misurati dei crateri ottenuti attraverso le prove con dinamite (GD) ed emulsione (EM).

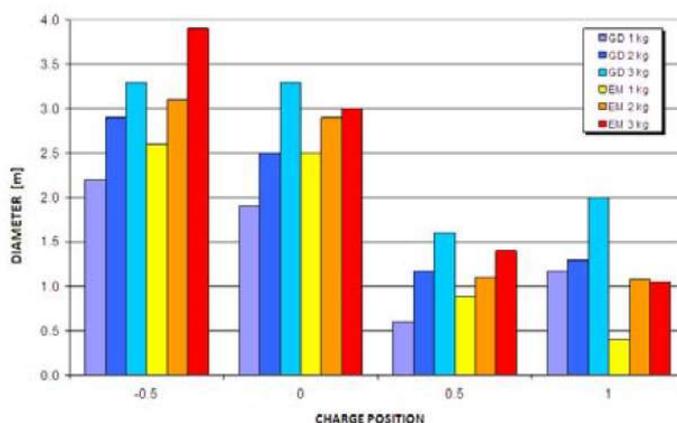


Figura 5.3 Diametri dei crateri misurati durante il test sperimentale per dinamite (GD) ed emulsione (EM) (Frigo et al., 2010)

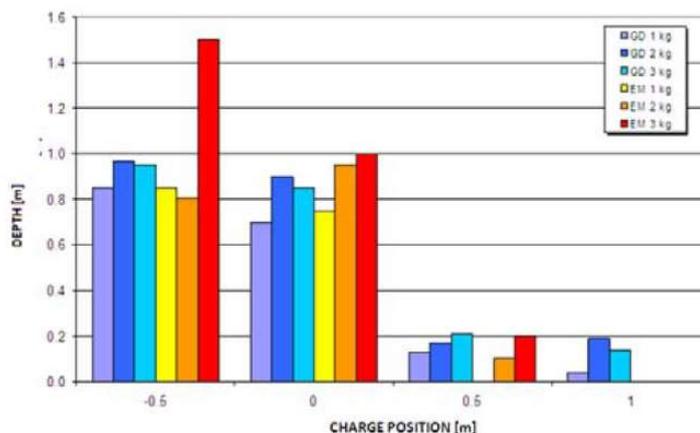


Figura 5.4 Profondità dei crateri misurate durante il test sperimentale per dinamite (GD) ed emulsione (EM) (Frigo et al., 2010)

Si nota che i crateri si sono effettivamente formati solo per le cariche collocate all'interno del manto nevoso e per quelle collocate all'interfaccia neve-aria e che le dimensioni di questi aumentano con l'incremento della massa della carica.

Per quanto riguarda i crateri generati dalle cariche poste all'interno del manto nevoso e all'interfaccia di questo con l'aria, le osservazioni dimostrano che questi assumono la forma "a" della Figura 5.5 che il Corps of Engineers garantisce presentarsi per valori di λ_c compresi tra + 0.5 e -2.

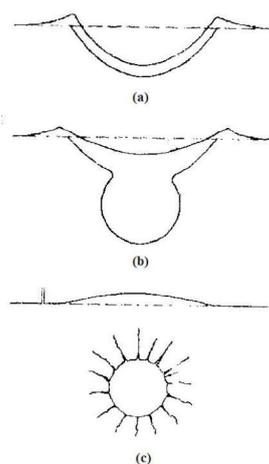


Figura 5.5 Forme tipiche dei crateri generati dallo scoppio all'interno del manto nevoso o all'interfaccia di questo con l'aria (Corps of Engineers, 1961)

I crateri generati dall'esplosione all'interno del manto nevoso mostrano una crescita costante del diametro all'incremento della massa della carica. I valori dei diametri sono stati interpolati mediante curve di potenza (Figura 5.6), da cui si sono ricavate le equazioni 5.2 e 5.3.

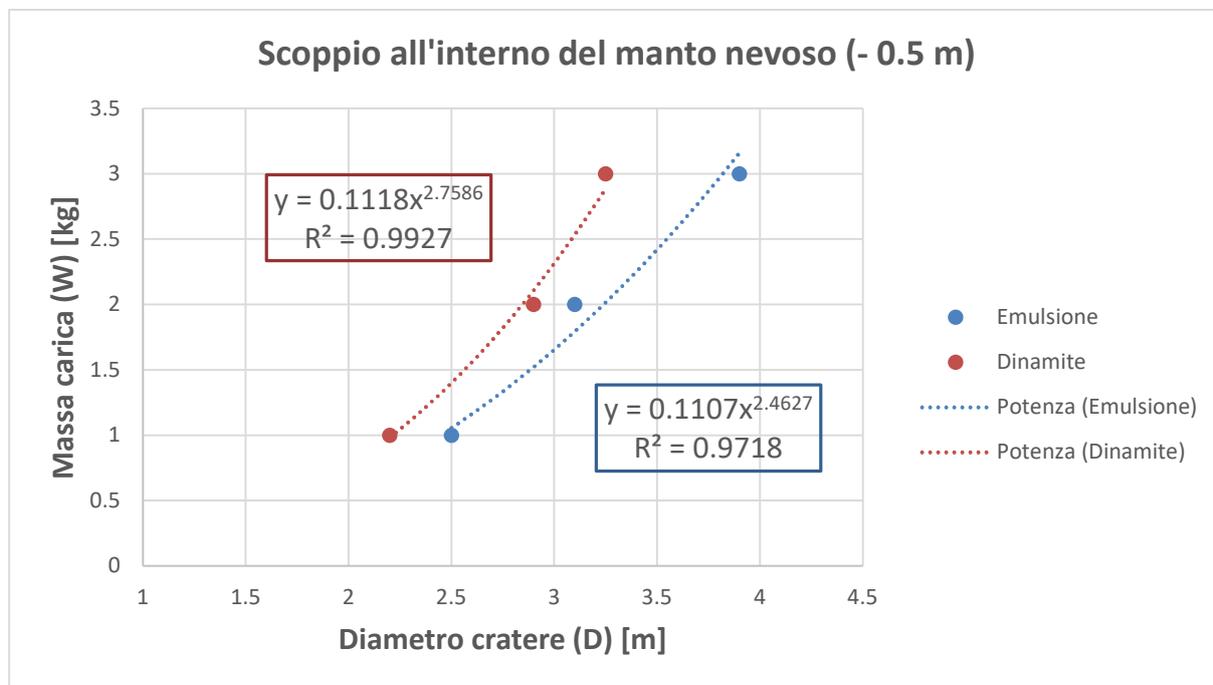


Figura 5.6 Correlazione tra i diametri dei crateri generati e le masse delle cariche utilizzate per emulsione e dinamite

- Per la dinamite:

$$W = 0.11 D^{2.75} \tag{5.2}$$

- Per l'emulsione:

$$W = 0.11 D^{2.46} \tag{5.3}$$

I crateri generati dall'esplosione sul manto nevoso, ovvero a quota $Z = 0$, mostravano un'interessante relazione tra la massa dell'esplosivo e la profondità H del cratere (Figura 5.7) che ha permesso di ricavare le equazioni 5.4 e 5.5.

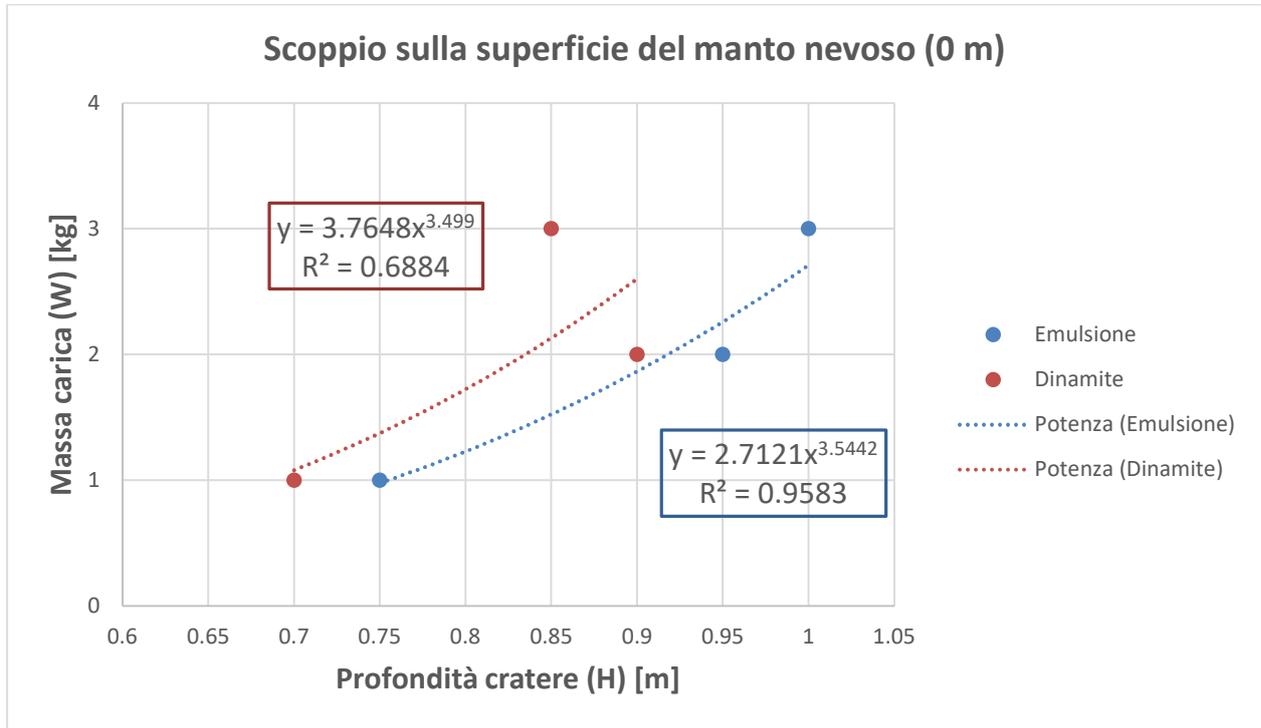


Figura 5.7 Correlazione tra la profondità dei crateri generati e le masse delle cariche utilizzate per emulsione e dinamite

- Per la dinamite:

$$W = 3.76 H^{3.5} \tag{5.4}$$

- Per l'emulsione:

$$W = 2.71 H^{3.5} \tag{5.5}$$

5.1.4 Conclusioni

Questo studio è stato fatto per identificare delle formule pratiche in grado di fornire una stima affidabile delle dimensioni dei crateri generati dalle esplosioni in funzione del posizionamento delle cariche. La ricerca non si può considerare completa a causa dei pochi dati disponibili, di problemi tecnici e pratici e misurazioni non omogenee, ma ha costituito una base di partenza per ulteriori campagne sperimentali.

5.2 Nonex vs GBT

5.2.1 Caratteristiche del sito e degli esplosivi

Come la sperimentazione appena descritta, anche questa [14] aveva l'obiettivo di valutare lo sviluppo di crateri nel manto nevoso in funzione della profondità di collocazione della carica e della sua massa.

Il test è stato sviluppato in un campo prove a La Thuile (AO), in località Les Moilles. Nel sito il manto nevoso presentava un'altezza totale di 0.8 m. I primi 0.5 m erano di neve compatta con una densità media di 450 kg/m^3 , i successivi 0.1 m erano composti da uno strato di fusione e rigelo e gli ultimi 0.2 m da un lastrone da vento. La temperatura media della neve era di $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ e la densità media di 400 kg/m^3 .

Per tale analisi sperimentale sono state testate due tipologie di esplosivo non detonante, quali il NONEX e il Green Break Technology (GBT).

Il NONEX è composto da una miscela pirotecnica confezionata in cartucce di plastica di massa variabile da 20 g a 500 g e diametri standardizzati di 12 mm, 28 mm, 34 mm, 60 mm. L'innesco è di tipo elettrico a media intensità e la reazione avviene con sviluppo di gas quali azoto, anidride carbonica e vapore acqueo. Le cartucce, se opportunamente confinate, garantiscono una velocità di reazione compresa tra i 500 e i 700 m/s.

Il NONEX ad oggi non è più in commercio ed è stato sostituito dalla tecnologia GBT, che ha comportamento analogo ma offre migliori prestazioni. Il GBT infatti, come il NONEX, garantisce lo sviluppo di un grande volume di gas innocui che esercitano una forte pressione sul mezzo, generandone la rottura, ma ha il vantaggio, rispetto al NONEX di garantire, a parità di massa della carica e di risultati, minori vibrazioni e rumori ridotti.

Nell'ottica dell'utilizzo del GBT nella neve, si osserva che questa tecnologia è utilizzata con buoni risultati nelle demolizioni subacquee. Le cartucce possono infatti essere integrate con supporti che le rendono resistenti all'acqua. Inoltre, al di sotto di certe profondità, in acqua, il borraggio non risulta necessario in quanto il confinamento viene fornito dalla pressione.

La scelta del GBT per questa tipologia di sperimentazione è dovuta alla bassa velocità di reazione di questo esplosivo: a causa dell'impedenza della neve, un esplosivo ad alta velocità a parità di massa avrebbe meno effetto data la dissipazione in ambiente di buona parte dell'energia. Tuttavia, sono sorte perplessità dovute al fatto che si sarebbero potuti ottenere risultati solo se l'esplosivo fosse stato in grado di formare un gas in pressione, ovvero se confinato, e tale confinamento sembrerebbe non avvenire in neve a causa della porosità e della bassa resistenza di questa.

5.2.2 Realizzazione del test

La campagna sperimentale prevedeva una disposizione lineare delle cariche, con innesco di ogni carica prima del posizionamento di quella successiva. In questo modo ogni carica è stata collocata in un manto indisturbato. Per la misurazione delle velocità di propagazione delle vibrazioni indotte dal brillamento delle cariche sono stati utilizzati dei geofoni triassiali.

Le cariche sono state collocate ad una profondità di 70 cm dalla superficie libera e a 10 cm dal suolo come rappresentato in *Figura 5.8*.

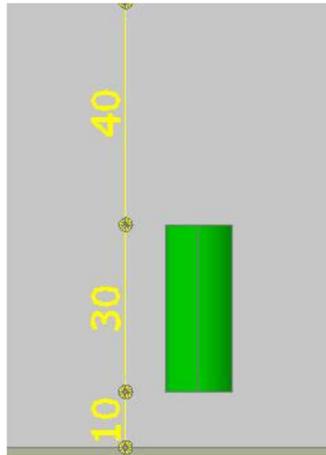


Figura 5.8 Collocazione di una carica all'interno del manto nevoso (Gorret E., 2014)

5.2.3 Resoconto prove

5.2.3.1 Prova 1 (h 10:20)

La prima prova è stata effettuata con una carica di GBT da 100 g visti i dubbi sulle garanzie di confinamento da parte della neve. L'esito di questo tentativo ha messo in luce l'inefficacia già ipotizzata di questo prodotto nella neve. Il manto nevoso risultava pressoché indisturbato se non per un piccolo cratere creatosi per effetto di fusione della neve a seguito del calore disperso dalla carica esplosiva. La cartuccia, come si può notare in *Figura 5.9*, è rimasta praticamente intatta al termine della prova, salvo il fondo della stessa in cui probabilmente si è canalizzata e dispersa la poca energia sviluppatasi nel foro.



Figura 5.9 Involucro intatto della cartuccia di GBT successivamente all'esplosione (Gorret E., 2014)

5.2.3.2 Prova 2 (h 10:30)

La seconda prova è stata effettuata nell'ottica di provare a risolvere i problemi verificatisi nella prima. A tale scopo è stata utilizzata una carica da 500 g di NONEX in sostituzione alla precedente da 100 g di GBT. Si è scelto di impiegare il NONEX perché le cartucce, diversamente da quelle di GBT, non hanno al fondo una membrana fine ma una plastica spessa quanto il resto dell'involucro. Anche questa seconda prova però non ha fornito un risultato positivo. Si è sviluppato un piccolo cratere, di diametro 17 cm e profondità 30 cm, anch'esso dovuto all'effetto termico e non alla reazione della carica (*Figura 5.10*). È stato dunque constatato che anche una carica di massa 500 g non comporta esplosioni senza confinamento, anche se in questo caso la cartuccia ha reagito ed è stata frantumata.



Figura 5.10 Dimensioni del foro generato nel manto nevoso dall'esplosione della cartuccia (Gorret E., 2014)

5.2.3.3 Prova 3 (h 11:10)

Visti i risultati deludenti delle due prove realizzate, per l'ultima prova si è deciso di provare a confinare l'esplosivo in un contenitore rigido costituito da un tubo in PVC con all'interno una resina indurente che inglobava la carica. L'intento di confinare la carica in un corpo solido è quello di ottenere un contenitore in cui i gas liberati dall'esplosione possano andare in pressione e una volta rotto il tubo agire sulla neve come un'onda di pressione. Anche quest'ultima prova ha fornito esito negativo: si è sviluppato un piccolo cratere, di diametro 17 cm e profondità 24 cm (*Figura 5.11*), da cui per circa 30 s è continuato ad uscire fumo e il

blocco di confinamento della carica è stato diviso in due (*Figura 5.12*). L'esplosione dunque è avvenuta ma la pressione è stata troppo limitata per garantire un effetto utile nella neve.



Figura 5.11 Residuo rimasto dopo l'esplosione della cartuccia (Gorret E., 2014)



Figura 5.12 Zona disturbata sulla superficie del manto nevoso in seguito all'esplosione della cartuccia (Gorret E., 2014)

5.2.4 Conclusioni

Ambedue le tipologie di esplosivo utilizzate non hanno pressoché dato luogo ad alcun effetto sulla neve. Nonostante le caratteristiche apparentemente favorevoli ad un'applicazione sulla neve, come la bassa velocità di reazione, le cariche non sono state in grado di reagire senza un confinamento adeguato. Si è ipotizzato come possibile soluzione al problema l'utilizzo di

contenitori sviluppati ad hoc che permettano ai gas di arrivare ad una pressione sufficiente a tale scopo. Questa via però è difficilmente percorribile a causa della complessità di ottimizzazione del rapporto costi/benefici per la necessità di reperire materiali ottimali, ad alta resistenza e a basso costo. La tipologia di esplosivo sperimentata, se adeguatamente confinata, potrebbe tuttavia garantire una buona efficacia in materiali come ghiaccio e permafrost.

5.3 Sniper vs Autostem

5.3.1 Caratteristiche del sito e degli esplosivi

Le prove sono state realizzate nel sito sperimentale dell'Alpe Devero, in località strada Goglio, collocato nel comune di Baceno.

Nel sito sperimentale il manto nevoso presentava altezze variabili da 0.7 a 1.2 m. In particolare è stato realizzato un rilievo del profilo del manto nevoso nella zona pianeggiante, dove sono state realizzate le prove (*Figura 5.13*). In questo punto il manto nevoso era isotermico con una temperatura di 0 °C e un'altezza di 1 m. I primi 10 cm circa manifestavano una densità di 130 kg/m³ mentre i successivi 15 cm presentavano un'alternanza di forme fuse e neve con una densità di 230 kg/m³. Al di sotto di questi primi 25 cm era presente uno strato di circa 15 cm di deposito di valanga con una densità di 360 kg/m³ seguito da uno strato sottile con densità di 230 kg/m³ ed infine da uno strato di 50 cm di neve con densità di 440 kg/m³. Si segnala inoltre la presenza di croste di fusione e rigelo tra 50 e 87 cm di profondità. Il dettaglio del rilievo è riportato in *Allegato 1*.



Figura 5.13 Sito sperimentale Alpe Devero ed alcune delle strumentazioni utilizzate per il rilievo del profilo del manto nevoso

Gli esplosivi sperimentati sono stati la carica pirica SNP25-H e le cartucce Autostem.

L'SNP25-H è un prodotto pirotecnico a velocità medio-bassa dotato di miccia ritardata e miccia di sicurezza per accensione diretta. Non esplose per simpatia, ovvero per innesco a causa di un'onda di pressione generata dall'esplosione di un'altra carica, e soprattutto non manifesta problemi a basse temperature. Tali caratteristiche, insieme al fatto che il suo involucro è totalmente biodegradabile, lo rendono ottimale per l'utilizzo sulla neve. Questo prodotto inoltre, operando a velocità inferiori rispetto ad altri esplosivi, ma per un tempo maggiore, può esercitare sulla superficie della neve una maggiore pressione. In questo modo garantisce una maggiore efficacia destabilizzante sul manto nevoso.

La carica ha una lunghezza di 27.5 cm e un diametro di 14.5 cm e perciò si può considerare sferica. Ha un peso lordo di 3 kg e un peso netto di esplosivo di circa 2.5 kg (*Figura 5.14*).



Figura 5.14 Carica di SNP 25

Per quanto riguarda la classificazione, ai fini della commercializzazione la carica rientra nella categoria P2, ovvero nei cosiddetti Flash Devices (dispositivi a effetto flash), mentre ai fini del deposito risulta di IV^a categoria T.U.L.P.S.

Le cariche di Autostem hanno un peso di 550 g e per questo, ai fini di una comparazione con la carica da 2.5 kg di SNP, ne sono state aggregate 4 per raggiungere un peso di 2.2 kg. Le 4 cariche sono state collegate in serie in modo che le resistenze fossero attraversate tutte dalla stessa intensità di corrente durante l'innesco elettrico. Le 4 cariche sono state fissate assieme con del nastro isolante e collocate in un tubo di plastica con opportuno borrhaggio (Figura 5.15). Il borrhaggio è stato effettuato mediante utilizzo di ghiaia collocata alla base, alla sommità e di lato alle cariche di modo da stabilizzarle al centro del tubo. Il tubo di plastica presentava una lunghezza di 56.5 cm e un diametro di 13 cm e dunque anche in questo caso era soddisfatto il principio di sfericità della carica.



Figura 5.15 Collocamento delle 4 cariche di Autostem all'interno del tubo di plastica

5.3.2 Realizzazione del test

Sono state realizzate 4 prove sperimentali: 3 con l'utilizzo del SNP e 1 con l'Autostem.

Le cariche di SNP sono state innescate tramite l'utilizzo di una miccia a lenta combustione mentre le cartucce di Autostem sono state fatte esplodere attraverso il collegamento dei reofori alla linea di tiro e mediante l'innesco da un esploditore.

Le prove sono state realizzate ad una distanza tale da garantire neve indisturbata dalla prova precedente.

5.3.3 Resoconto prove

5.3.3.1 Prova 1

È stata fatta esplodere una carica di SNP sulla superficie del manto nevoso pianeggiante e con uno spessore di 0.75 m. L'esito della prova è stato positivo: nel manto nevoso si è formato un cratere di diametro minore pari a 1.15 m, diametro maggiore di 1.2 m e

profondità 0.6 m. In seguito alla prova rimanevano dunque sul terreno, al centro del cratere, 0.15 m di neve. In *Figura 5.16* si riporta un'immagine del cratere generato mentre in *Figura 5.17* e *Figura 5.18* si riportano i dettagli della sua geometria.



Figura 5.16 Procedimento di misura dei crateri (foto da drone)

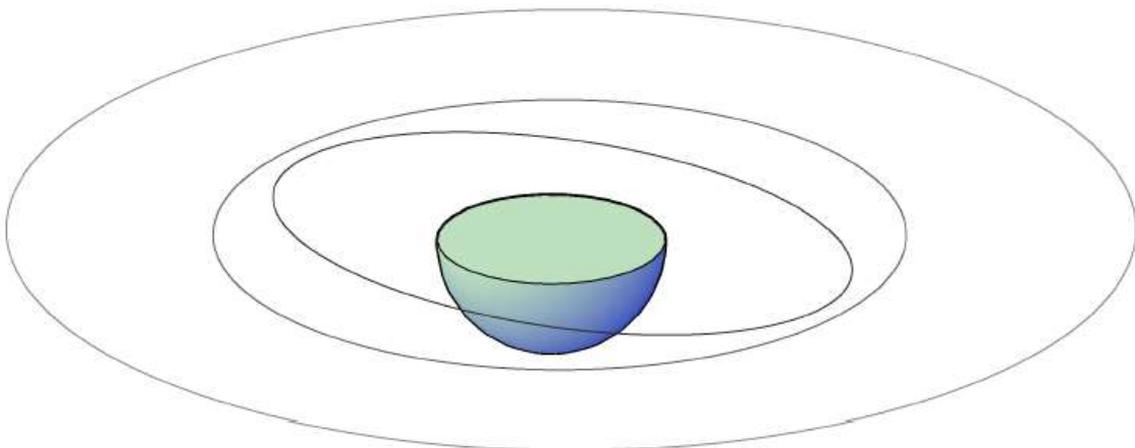


Figura 5.17 Modello tridimensionale del cratere generato dalla prima prova con SNP

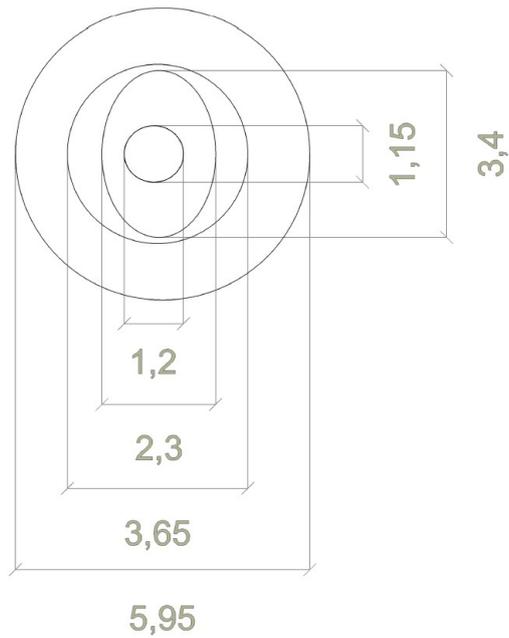


Figura 5.18 Dettaglio dimensionale del cratere generato dalla prima prova con SNP

5.3.3.2 Prova 2

È stato innescato il sistema costituito dalle 4 cartucce di Autostem all'interno del tubo di plastica sulla superficie del manto. L'esito della prova è stato negativo: l'unico effetto visibile è stato la distruzione del tubo lungo un lato ma non si è manifestata la formazione neanche di un cratere di piccole dimensioni (Figura 5.19).



Figura 5.19 Tubo di plastica distrutto in seguito alla detonazione delle cariche di Autostem

5.3.3.3 Prova 3

È stata innescata una carica di SNP sulla superficie del manto nevoso pianeggiante con altezza di 0.7 m. Anche in questo caso la prova ha avuto successo e si è formato un cratere con entrambi i diametri pari a 1.3 m e una profondità di nuovo di 0.6 m. In seguito alla prova rimanevano sul terreno 0.10 m di neve. In *Figura 5.20* si riporta un'immagine del cratere generato mentre in *Figura 5.21* e *Figura 5.22* si riportano i dettagli della sua geometria.



Figura 5.20 Cratere generato dalla seconda prova con SNP

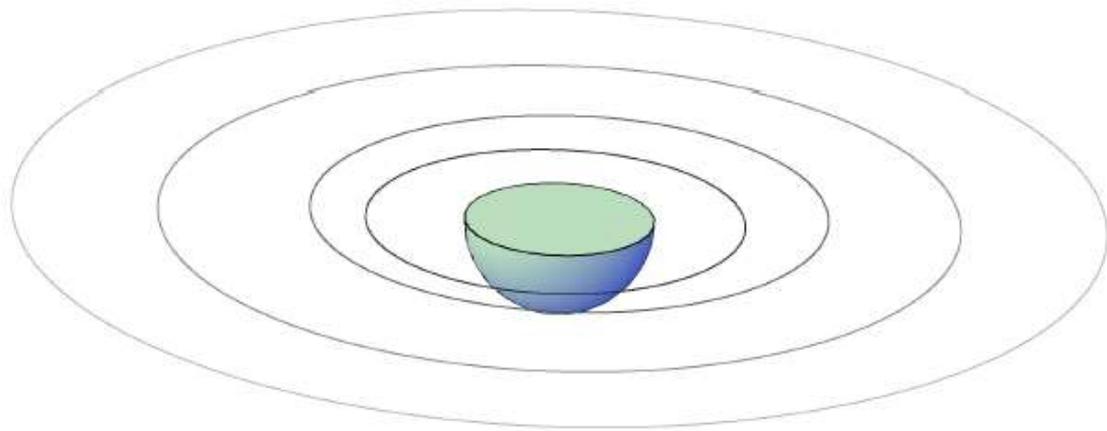


Figura 5.21 Modello tridimensionale del cratere generato dalla seconda prova con SNP

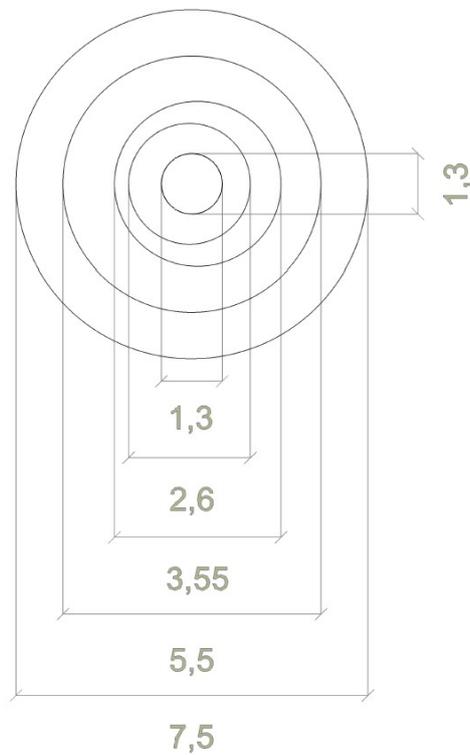


Figura 5.22 Dettaglio dimensionale del cratere generato dalla seconda prova con SNP

5.3.3.4 Prova 4

L'ultima carica di SNP è stata fatta esplodere su un pendio inclinato e con un'altezza di neve maggiore e in particolare pari a 1.2 m. L'esito della prova è stato positivo: si è formato un

cratere di diametro minore pari a 1.45 m e diametro maggiore pari a 1.5 m con una profondità di 0.6 m. Lo spessore del manto nevoso rimasto indisturbato al di sotto del cento del cratere era dunque di 0.6 m. In *Figura 5.23* si riporta un'immagine del cratere generato mentre in *Figura 5.24* e *Figura 5.25* si riportano i dettagli della sua geometria.



Figura 5.23 Cratere generato dalla terza prova con SNP

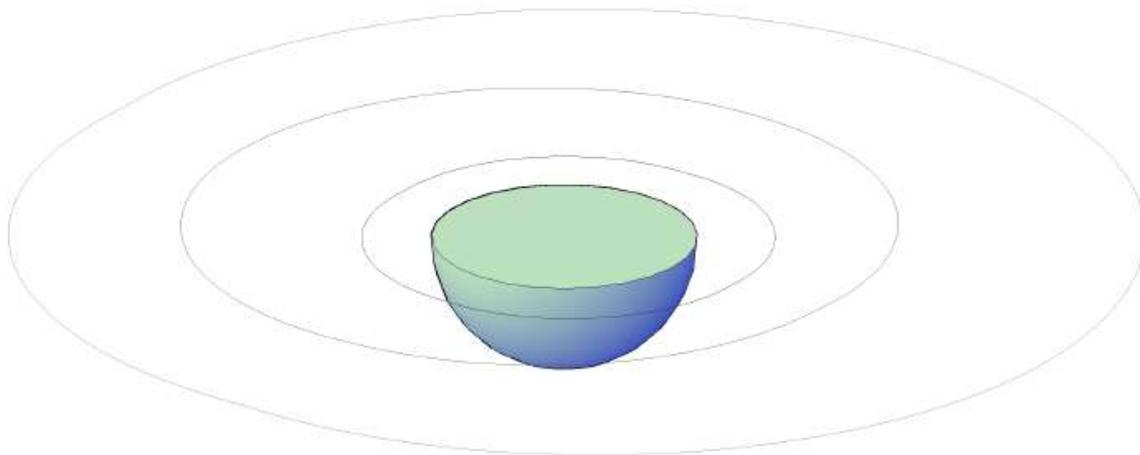


Figura 5.24 Modello tridimensionale del cratere generato dalla terza prova con SNP

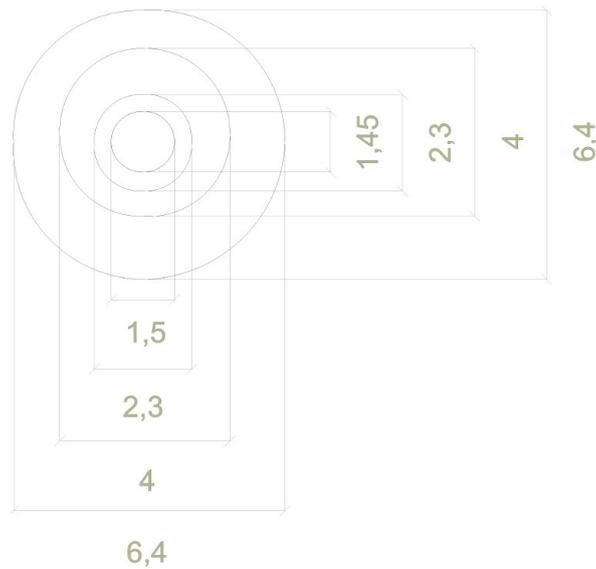


Figura 5.25 Dettaglio dimensionale del cratere generato dalla seconda prova con SNP

5.3.4 Conclusioni

Dalle prove è emerso che l'SNP è in grado di garantire, in determinate condizioni, la formazione di crateri. Tale effetto non si è ottenuto con le cariche di Autostem: infatti, nonostante la collocazione in un involucro plastico, che consentisse di confinare opportunamente la carica al fine di garantire la variazione di pressione necessaria ad interagire con la neve, si è ottenuta la sola distruzione del tubo. Il problema di queste ultime cariche circa il loro utilizzo in neve non è dunque da attribuire tanto all'involucro quanto proprio ad una sostanziale differenza chimica delle polveri costituenti le due tipologie di esplosivo.

Tutte le 3 prove che hanno dato luogo alla formazione di un cratere manifestavano più o meno evidentemente delle geometrie concentriche con differenti livelli di disturbo superficiale del manto nevoso. In *Figura 5.18*, *Figura 5.22* e *Figura 5.25* sono stati riportati i diametri delle ellissi per i crateri dove tali geometrie erano ben visibili nelle due direzioni perpendicolari, mentre sono state approssimate a circonferenze quelle in cui le geometrie erano facilmente osservabili solo in una direzione.

6 Conclusioni

Nel corso dell'elaborato sono state descritte diverse metodologie di distacco artificiale e ne sono state evidenziate le sostanziali differenze, dovute alle caratteristiche tecniche, alla facilità e applicabilità in determinate situazioni e soprattutto alle valutazioni costi-benefici che ne comportano la scelta in termini operativi. In *Tabella 6.1* si riportano i punti chiave che possono influire sulla migliore valutazione del metodo di distacco.

Tabella 6.1 Prospetto riassuntivo delle principali metodologie di distacco artificiale (Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa, Progetto strategico "RISK NAT", 2012)

Metodo di distacco	Detonante	Mobilità	Limiti d'uso	Costi principali
Artiglierie e lanciarazzi	Esplosivo tradizionale	Trasportabile	Vietato in Italia, condizioni meteorologiche	Acquisto
Avalancheur	Esplosivo liquido binario	Fisso	Vietato in Italia, condizioni meteorologiche, mobilità	Acquisto
Lancio a mano	Esplosivo tradizionale	Trasportabile	Restrizioni legali	Acquisto
Messa in opera per scivolata	Esplosivo tradizionale	Trasportabile	Restrizioni legali	Acquisto
Sistema Vassale	Esplosivo tradizionale	Elitrasportabile	Restrizioni legali, condizioni meteorologiche	o Acquisto ed utilizzo
Catex	Esplosivo tradizionale	Fisso	Restrizioni legali, mobilità	Acquisto ed installazione
Wyssen charge dropper	Esplosivo tradizionale	Fisso	Vietato in Italia, mobilità	Acquisto ed installazione
Wyssen tower	Esplosivo tradizionale	Fisso	Vietato in Italia, mobilità	Legali,
Gazex	Miscela di gas ossigeno/propano	Fisso	Mobilità	Acquisto ed installazione
Daisybell	Miscela di gas ossigeno/idrogeno	Elitrasportabile	Condizioni meteorologiche	Acquisto ed utilizzo
Avalhex	Miscela di gas ossigeno/idrogeno	Fisso	Mobilità	Acquisto ed installazione
Heli-Avalhex	Miscela di gas ossigeno/idrogeno	Elitrasportabile	Condizioni meteorologiche	Acquisto ed utilizzo
O'Bellx	Miscela di gas ossigeno/idrogeno	Fisso	Mobilità	Acquisto ed installazione

Dalle caratteristiche osservabili in *Tabella 6.1* per le diverse tecniche, emerge che non esiste un metodo migliore in assoluto, ma che la scelta dipende oltre a quanto già detto anche dalle caratteristiche del sito valanghivo e, per quanto riguarda l'Italia, soprattutto dal

contesto normativo. Proprio quest'ultima restrizione ha comportato negli ultimi anni un maggiore sviluppo dei sistemi che inducono il distacco di masse nevose attraverso la reazione di miscele gassose rispetto a quelli che utilizzano l'esplosivo. Questi infatti sono regolati da una normativa più restrittiva.

Per quanto riguarda i confronti tra le differenti tipologie di esplosivo cui fanno riferimento i paragrafi 5.1, 5.2 e 5.3 è emersa la totale inefficacia delle cartucce di NONEX, GBT e Autostem. Nonostante la loro bassa velocità di reazione, queste non sono state in grado di produrre crateri nel manto nevoso. Circa queste tre tipologie di cariche si ipotizza che esse possano avere effetto se confezionate all'interno di particolari involucri differenti da quelli testati, ovvero tubi in PVC e plastica. Tali involucri dovranno essere in grado di mandare in pressione i gas liberati dall'esplosione fino alla loro rottura per migliorarne l'efficacia sulla neve.

Si ritiene che siano necessarie ulteriori sperimentazioni condotte con accorgimenti, ancora da mettere a punto, che possano dimostrare l'efficienza di queste cariche.

Per contro, fortunatamente, le prove sperimentali dei paragrafi 5.1 e 5.3 hanno dimostrato l'efficienza nel manto nevoso della dinamite, delle emulsioni e dell'esplosivo SNP.

La sperimentazione con emulsione e dinamite all'interno del manto nevoso hanno evidenziato una relazione che correla la massa dell'esplosivo utilizzata W con il diametro del cratere generato D . Tale relazione è del tipo:

$$W = 0.1 D^a \quad (6.1)$$

In cui a è un parametro che varia in funzione della tipologia di esplosivo e che nei casi analizzati vale circa 2.5 per l'emulsione e circa 2.8 per la dinamite.

La sperimentazione con innesco sulla superficie del manto nevoso ha invece evidenziato una correlazione tra la massa dell'esplosivo utilizzata W e la profondità del cratere generato H . La relazione emersa è la seguente:

$$W = b H^{3.5} \quad (6.2)$$

In cui b è nuovamente un parametro che dipende dalla tipologia di esplosivo e che nei casi analizzati vale circa 2.7 per l'emulsione e circa 3.8 per la dinamite.

Dal confronto di tali prove con quelle realizzate mediante il sistema SNP, è emersa la minore efficacia di quest'ultimo: le cariche SNP hanno dato luogo a crateri di dimensioni minori e con minori profondità. Valutazioni realizzate mediante l'equazione 6.2 hanno messo in luce la necessità di quadruplicare se non quintuplicare la carica di SNP per ottenere crateri di dimensioni simili a quelli ottenuti con esplosivi detonanti. La *Figura 6.1*, che riporta i diametri e le profondità dei crateri generati dagli scoppi in superficie, evidenzia la minore efficacia della carica da 2.5 kg di SNP anche rispetto a quelle di emulsione e di dinamite da 1 kg. Le prove sono state tuttavia realizzate in luoghi diversi e quindi le valutazioni circa l'efficacia sono inficiate dai differenti valori di densità della neve e dalle differenti caratteristiche di sito. La minore efficienza dell'esplosivo SNP va in questo caso anche in parte attribuita ai maggiori valori di densità della neve nel sito sperimentale dell'Alpe Devero rispetto a quelli del Lago Gabiet.

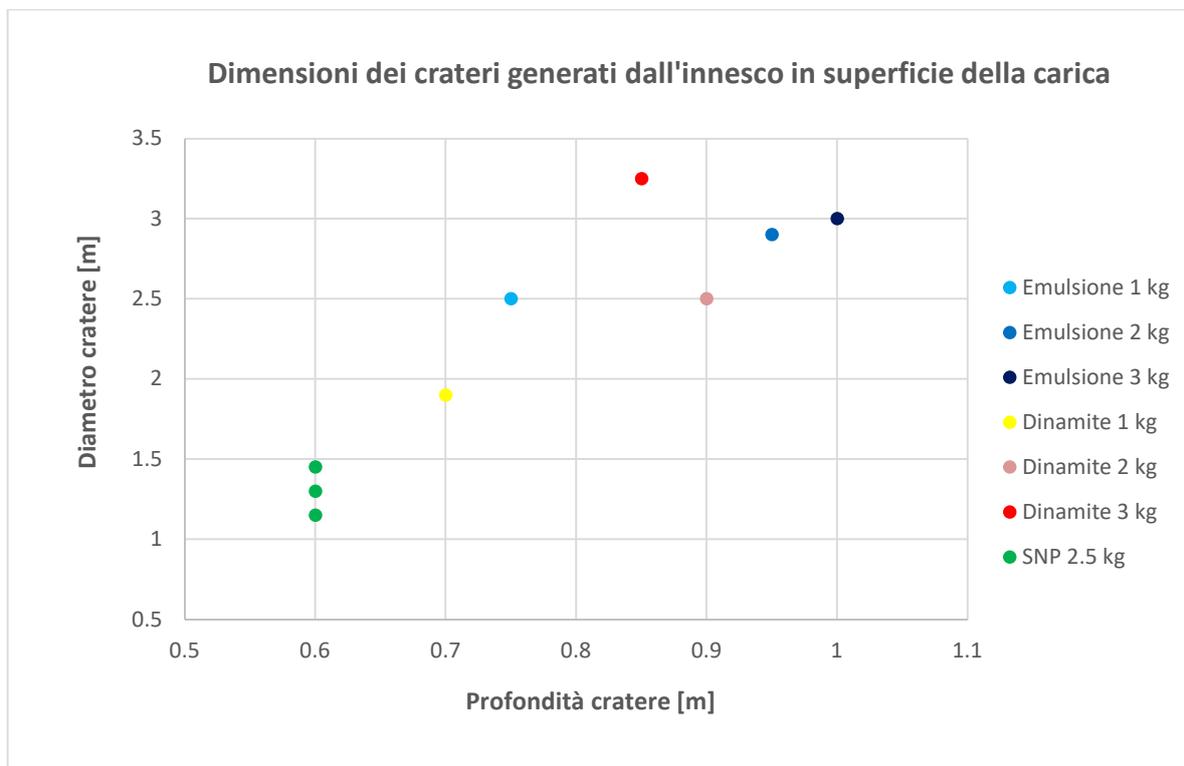


Figura 6.1 Dimensioni dei crateri generati dall'innescò superficiale della carica nelle campagne sperimentali del Lago Gabiet e dell'Alpe Devero

Infine, vale la pena osservare la quasi perfetta forma emisferica dei crateri generati dall'innescò delle cariche SNP. Le prove hanno evidenziato il cratere apparente e il cratere reale e, in superficie, i differenti livelli di disturbo del manto nevoso rappresentativi delle variazioni di sovrappressione alle diverse distanze dal punto di innescò.

Ringraziamenti

A corredo di questo lavoro è doveroso esprimere un grande ringraziamento nei confronti di tutte le persone che con il loro supporto hanno permesso il raggiungimento di questo traguardo.

Senza ombra di dubbio, il maggiore ringraziamento va rivolto alla Professoressa Marilena Cardu che, nonostante il difficile periodo di comunicazione che stiamo vivendo, è sempre stata disponibile e immediata nelle risposte ai miei dubbi e alle mie curiosità.

Un grande ringraziamento va a Paolo Pastuglia, produttore delle cartucce Autostem, che mi ha trasmesso la voglia e la curiosità di sperimentare l'efficienza delle sue cariche nella neve. A lui faccio un enorme in bocca al lupo per le future applicazioni delle suddette cariche nel manto nevoso.

Grazie anche a Nicola Dameno, esperto fochino che ha reso possibile la sperimentazione presso l'Alpe Devero, alla Professoressa Barbara Frigo per le proficue chiacchierate e al comune di Baceno che ha autorizzato lo svolgimento delle prove.

Grazie a tutti i miei amici e ai miei compagni di avventura nella vita universitaria per il loro costante supporto morale e affettuoso.

Infine, non sarà mai abbastanza la gratitudine nei confronti della mia famiglia, in primis come finanziatrice di questo percorso universitario e poi per aver sempre creduto nelle mie potenzialità in questi lunghi anni di studi.

Grazie a chi c'è sempre stato, ogni giorno, senza aspettarsi nulla in cambio.

7 Bibliografia

- [1] Chiaravalloti L. E., «Meccanica dell'innesco di valanghe nevose tramite esplosivo», Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2006.
- [2] Barbolini M., «Corso Neve e Valanghe», in *Università degli studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale*, 2005.
- [3] Clusaz C., «Valanga del Lavancher – Dailley (Morgex, Aosta): analisi e opere di difesa», Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2005.
- [4] Chianale C., «Tecniche per il distacco controllato di valanghe di neve», Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2001.
- [5] Ancey C. e Charlier C., «Quelques réflexions autour d'une classification des avalanches», *Revue de Géographie Alpine*, n. 84, pp. 9-21, 1996.
- [6] Giani G., «Classificazione e tipologia delle valanghe di neve», GEAM, 2006.
- [7] Bruno E., Maggioni M., Freppaz M. e Zanini E., Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa, Progetto strategico "RISKMAT", 2012.
- [8] Squillace D. G. A., «Efficienza di sistemi per il distacco artificiale di valanghe di neve», tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2019.
- [9] Berthet-Rambaud P., «Comparison of shock waves provoked by various artificial avalanche release techniques, and of their effects on the snowpack», *International*

Snow Science Workshop, pp. 328-329, 2009.

[10] Atlas Powder Company, *Explosives and rock blasting*, 1987.

[11] Frigo B., Chiaia B. e Cardu M., «Snowpack effects induced by blasts: experimental measurements vs theoretical formulas», *International Snow Science Workshop*, 2012.

[12] Cresta R., *L'esplosivo e la neve*, CAI Ed, 2002.

[13] Scaini S. (Dexplo s.r.l.), Valenzano P. e Baravex E., «Il distacco artificiale di valanghe alla luce dei fenomeni di variabilità spaziale e di dinamica», in *Atti del 3° Convegno Nazionale EXPLO 2005 di Esplosivistica Generale*, Castelmaggiore, 2005.

[14] Gorret M. E., «Distacco artificiale di masse nevose: prestazioni pratiche e teoriche di esplosivi non detonanti», Politecnico di Torino, 2014.

Siti consultati:

- academia.edu
- arpa.piemonte.it
- autostem.it
- ekuonews.it
- elitellina.com
- lacroix-defense.com
- protezionecivile.gov.it
- slf.ch
- snipertechnology.it
- tas.fr
- wysseavalanche.com