



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

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

A. A. 2022/2023

Sessione di Laurea ottobre 2023

Effetti delle valanghe di neve sulle infrastrutture energetiche

Relatori:

Maddalena Marchelli

Valerio De Biagi

Candidato:

Federica Terzago

Sommario

1. Abstract	4
2. Introduzione	5
2.1. Manto nevoso e stabilità.....	5
2.1.1. Cristalli di neve	5
2.1.2. Metamorfismo della neve e stabilità	8
2.1.3. Brina di superficie	8
2.2. Valanghe di neve	9
2.2.1. Classificazione delle valanghe	11
2.3. Pendii valanghivi.....	15
2.3.1. Influenza della pendenza	15
2.3.2. Influenza del vento	16
2.3.3. Influenza dell'orientazione rispetto al Sole	17
2.3.4. Influenza del bosco	17
2.4. Strutture di protezione dalle valanghe	17
2.4.1. Opere strutturali di difesa attiva	17
2.4.2. Opere strutturali di difesa passiva	19
2.4.3. Opere non strutturali	21
3. Dinamica e modellazione delle valanghe	23
3.1. Modelli empirici	24
3.1.1. Modelli regressivi.....	24
3.1.2. Modelli inferenziali	26
3.2. Modelli fisicamente basati.....	27
3.2.1. Modelli a centro di massa	28
3.2.2. Modelli continui.....	32
3.3. Codici di calcolo per lo studio della dinamica delle valanghe	32
4. Calcolo della pressione di impatto	36
4.1. Valanghe radenti su ostacoli larghi.....	36
4.2. Valanghe radenti su un ostacolo stretto	37
4.3. Valanghe nubiforme	38
4.4. Valanga di tipo misto	39
4.5. Numero di Froude e pressione d'impatto.....	41
5. Effetti delle valanghe polverose sui cavi dall'alta tensione.....	42
6. Strutture di sostegno delle linee elettriche aeree.....	46
6.1. Strutture di sostegno a palo.....	46

6.1.1.	Dimensioni tipiche delle strutture di sostegno a palo	47
6.2.	Strutture di sostegno a traliccio	48
6.3.	Fondazioni delle strutture di sostegno	49
6.4.	Effetti delle valanghe di neve sulle strutture di sostegno	49
6.4.1.	Effetti delle valanghe di neve sulle strutture di sostegno a palo	50
6.4.2.	Effetti delle valanghe di neve sulle strutture di sostegno a traliccio.....	51
6.4.3.	Effetti delle valanghe di neve sui plinti di fondazione.....	51
7.	Eventi valanghivi che hanno danneggiato infrastrutture energetiche in Valle d'Aosta	53
7.1.	V-01-088:.....	53
7.1.1.	Danni:.....	54
7.1.2.	Foto evento valanghivo:.....	55
7.2.	V-01-109.....	56
7.2.1.	Danni:.....	56
7.2.2.	Foto evento valanghivo:.....	57
7.3.	V-05-036.....	58
7.3.1.	Danni:.....	59
7.3.2.	Foto evento valanghivo:.....	61
7.4.	V-09-038_B.....	63
7.4.1.	Danni:.....	64
7.4.2.	Foto evento valanghivo:.....	65
7.5.	V-09-065.....	68
7.5.1.	Danni:.....	69
7.5.2.	Foto evento valanghivo:.....	70
7.6.	V-12-121.....	71
7.6.1.	Danni:.....	71
7.6.2.	Foto evento valanghivo:.....	72
7.7.	V-13-017.....	73
7.7.1.	Danni:.....	73
7.7.2.	Foto evento valanghivo:.....	74
7.8.	V-13-39.....	75
7.8.1.	Danni:.....	75
7.8.2.	Foto evento valanghivo:.....	77
7.9.	V-13-066 e V-13-067	79
7.9.1.	Danni:.....	80
7.9.2.	Foto zona di accumulo eventi valanghivi n. 66 e n. 67.....	80
7.9.3.	Foto evento valanghivo n. 66	81

7.9.4.	Foto evento valanghivo n. 67	81
7.10.	V-14-054.....	83
7.10.1.	Danni:.....	83
7.10.2.	Foto evento valanghivo:.....	84
7.11.	V-16-009.....	86
7.11.1.	Danni:.....	86
7.11.2.	Foto evento valanghivo:.....	87
7.12.	V-19-054.....	89
7.12.1.	Danni:.....	90
7.12.2.	Foto evento valanghivo:.....	91
7.13.	V-19-114.....	93
7.13.1.	Danni:.....	94
7.13.2.	Foto evento valanghivo:.....	96
7.14.	Osservazioni	99
8.	Vulnerabilità dei pali a sezione circolare soggetti a valanga di tipo radente: creazione di curve di fragilità 100	
8.1.	Palo in acciaio.....	104
8.2.	Palo in legno di castagno	107
8.3.	Osservazioni	111
9.	Conclusioni	113
10.	Bibliografia e sitografia	115

1. Abstract

Nel presente testo si intendono indagare gli effetti delle valanghe di neve sulle infrastrutture energetiche. Per fare questo si è iniziato dall'analizzare quali siano le caratteristiche delle valanghe di neve, da come si originano, considerando quindi anche la formazione e l'evoluzione del manto nevoso da cui hanno origine, a come evolvono durante il loro moto verso valle.

Una volta inquadrare le caratteristiche delle valanghe e come tramite esse possano essere classificate, si sono riportati i modelli di calcolo disponibili per lo studio di questi fenomeni; ognuno di essi, sviluppato per una specifica tipologia di valanga, è un aiuto fondamentale per la valutazione del rischio caduta valanghe a cui è sottoposto un territorio. Infatti, tramite tutti i modelli di valanghe è possibile determinare la distanza d'arresto massima di una valanga attesa in un dato territorio e nei modelli più recenti è possibile ottenere anche velocità e altezza del flusso della valanga stessa.

Si è successivamente indagato quali fossero le azioni esercitate dalle valanghe sulle strutture su cui potrebbero impattare. Alcuni software presentano già al loro interno le procedure di calcolo necessarie per la determinazione delle pressioni d'impatto di una valanga, esse utilizzano i valori di velocità e altezza di flusso ottenuti dai modelli di calcolo delle valanghe presenti al loro interno. Si è tuttavia ritenuto necessario riportare procedure di calcolo delle pressioni d'impatto di una valanga utilizzabili senza la necessità dell'impiego di software. Questi metodi di calcolo delle pressioni d'impatto sono infatti utili se si intende studiare il comportamento di determinate strutture sotto l'effetto di varie tipologie di valanghe non sito specifiche.

Lo studio dell'effetto di valanghe di neve non sito specifiche su un determinato tipo di struttura è quello che verrà svolto alla fine di questa tesi; infatti, si andrà a calcolare la vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo delle linee elettriche aeree quando impattate da una valanga radente di neve umida. In questo caso non sarebbe utile l'utilizzo di un modello, il quale richiede di inserire al suo interno la topografia del percorso valanghivo più o meno semplificata, bensì sarà utile ricavare le possibili azioni esercitate dalla valanga sulle strutture considerando i possibili range di pressione d'impatto e altezza di flusso che la tipologia di valanga scelta può possedere.

Prima di riportare la procedura di calcolo con cui si è determinata prima la vulnerabilità e poi le curve di vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo in caso di evento di una valanga radente di neve umida, si è ritenuto necessario fare un excursus su quali fossero le tipologie e le caratteristiche delle strutture di sostegno delle linee elettriche aeree utilizzate sul territorio. La scelta di andare a ricercare la vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo è stata presa considerando quali fossero i danni che normalmente le valanghe causano alle infrastrutture energetiche, in particolare si sono ricercati i danni causati dalle valanghe consultando il catasto valanghe della Valle d'Aosta in cui si è riscontrato che i pali fossero tra le strutture che negli anni sono state danneggiate dalle valanghe.

2. Introduzione

Le valanghe sono uno dei rischi naturali con cui l'uomo ha dovuto nel tempo imparare a convivere. In territorio italiano le valanghe interessano le aree montane a quote medio - alte, mentre in Paesi a latitudini maggiori possono anche interessare aree prossime al mare. L'importanza dello studio dei fenomeni valanghivi in territorio italiano, come per le altre Nazioni delle Alpi, è data dalla grande densità abitativa delle valli montane; questo fa sì che vi siano edifici e/o infrastrutture in aree soggette a rischio di caduta valanghe; in particolare, in questa tesi, ci si concentrerà sull'interazione fra le valanghe e le linee elettriche aeree in territorio soggetto a rischio valanghe.

Prima di andare a indagare come le valanghe interagiscano con le strutture su cui impattano è necessario comprenderne le loro caratteristiche e come si generano. Per questo motivo ci si concentrerà inizialmente sulle caratteristiche del manto nevoso (Capitolo 2.1), analizzando prima come si forma e come evolve il manto nevoso stesso. Nel Capitolo 2.2, note le caratteristiche della neve, si potranno illustrare quali siano le tipologie di valanghe esistenti, dalle loro cause d'innescò a come evolvono nel loro moto. Per poter essere in grado di riconoscere quali tipologie di valanghe si possono generare in un determinato luogo e in quali circostanze nel Capitolo 2.3 si illustrerà come le caratteristiche dei pendii, come ad esempio vento e morfologia del terreno, influenzino sulla possibile formazione delle valanghe. Infine, nel Capitolo 2.4 verranno mostrate le principali tecniche di mitigazione del rischio utilizzate per mettere in sicurezza strutture e infrastrutture dalla possibile caduta di una valanga.

2.1. Manto nevoso e stabilità

Per comprendere e studiare gli effetti delle valanghe serve innanzitutto comprendere come si formano e in quali tipologie si suddividono e, per comprenderne le caratteristiche, si deve iniziare dall'analizzare come si forma e come evolve il manto nevoso da cui potrebbero innescarsi.

Il manto nevoso si forma in seguito all'accumulo di fiocchi di neve sul terreno, i quali sono costituiti da acqua allo stato solido. In seguito al susseguirsi delle nevicate e al variare delle condizioni climatiche (umidità, temperatura, irraggiamento e vento) in cui si trova il manto nevoso si modificano le sue caratteristiche che possono portarlo a una sua stabilizzazione o a una sua instabilizzazione con conseguente innescò di una valanga.

Dato che il manto nevoso si forma in seguito all'accumulo di fiocchi di neve si inizierà dalla caratterizzazione dei fiocchi di neve stessi nel Capitolo 2.1.1, riportando come le caratteristiche dell'atmosfera in cui si formano influenzino le caratteristiche dei fiocchi stessi. Successivamente si illustrerà come il manto nevoso, una volta formatosi, evolve e quindi quali siano i processi di metamorfismo a cui è sottoposto nel Capitolo 2.1.2. Infine, ci si concentrerà sulla brina di superficie nel Capitolo 2.1.3 in quanto si tratta di una delle cause principali di distacco di alcuni tipi di valanghe che si può formare sul manto nevoso.

2.1.1. Cristalli di neve

I fiocchi di neve sono costituiti da acqua che si solidifica in atmosfera formando piccoli cristalli di ghiaccio. Una volta raggiunta una massa sufficientemente grande per cui i fiocchi di neve non riusciranno più a rimanere in sospensione in atmosfera essi cadranno a terra andando, accumulandosi, a formare il manto nevoso.

I cristalli di neve si formano all'interno delle nuvole per condensazione del vapore acqueo attorno a piccole particelle, aventi diametro di circa 1 μm , chiamate nuclei di condensazione.

Una volta che le prime gocce di vapore si sono condensate in piccoli cristalli, essi si ingrandiranno seguendo due meccanismi:

- Per condensazione di molecole di vapore acqueo, andando così a formare cristalli di forma ramificata.
- Per aumento di massa in seguito allo scontro con goccioline d'acqua surraffreddate durante la caduta, formando cristalli più tondeggianti.

I cristalli di ghiaccio presentano tre assi intrinseci principali di cui due sul piano basale con un angolo di 120° (asse a e asse b), che forniscono una forma a pianta esagonale tipica dei fiocchi di neve, e un terzo perpendicolare al piano (asse c).

La direzione di crescita dei cristalli dipende dalla temperatura e dalle condizioni atmosferiche ossia dalla sovrasaturazione dell'aria, come mostro in Figura 1.

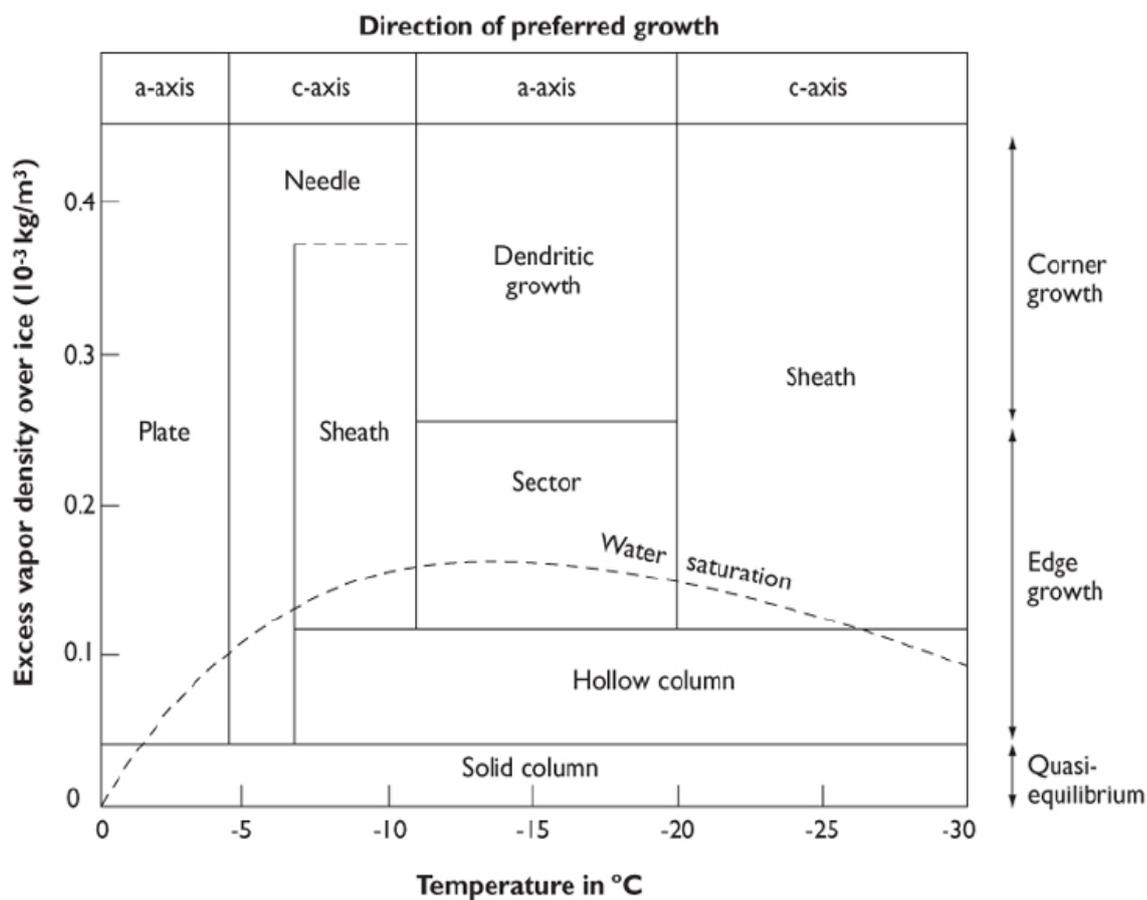


Figura 1: direzione di crescita dei cristalli di neve in base alla temperatura e alla quantità di vapore acqueo presente (McClung & Schaerer, 1996).

Le molecole di vapore acqueo tenderanno a trasferirsi sui cristalli in corrispondenza di bordi e angoli perché in questi punti la densità di vapore in eccesso è massima, per questo la crescita dovuta alla condensazione del vapore acqueo favorisce forme ramificate dei fiocchi di neve.

In generale, i cristalli che attraversano un'atmosfera fredda tendono ad avere dimensioni minori rispetto ai cristalli che hanno attraversato un'atmosfera più calda, perché il tasso di crescita è maggiore a temperatura più elevata. L'aria calda può trattenere, teoricamente, una maggiore quantità di umidità rispetto all'aria fredda e quindi favorisce la crescita dei cristalli. La Figura 2 mostra la varietà di forme che possono assumere i fiocchi di neve a causa dei meccanismi appena descritti.

	Ia Columns 	Short prismatic crystal, solid or hollow	Growth at high supersaturation at -3° to -8°C and below -22°C
	Ib Needles 	Needle-like, approx. cylindrical	Growth at high supersaturation at -3° to -5°C
	Ic Plates 	Plate-like, mostly hexagonal	Growth at high supersaturation at 0° to -3°C and -8° to -25°C
	Id Stellar Crystals 	Six-fold star-like, planar or spatial	Growth at high supersaturation at temperatures between -12° and -16°C
	Ie Irregular particles 	Clusters of very small crystals	Polycrystals growing at varying environmental conditions
	If Graupel 	Heavily rimed particles	Heavy riming of particles by accretion of supercooled water
	Ig Hail 	Laminar internal structure, translucent or milky, glazed surface	Growth by accretion of supercooled water
	Ih Ice pellets 	Transparent, mostly small spheroids	Frozen rain

Figura 2: Classificazione dei cristalli di neve (McClung & Schaerer, 1996).

Quando i cristalli di neve crescendo raggiungono un peso sufficientemente elevato tenderanno a cadere a terra. I fiocchi di neve che giungono a terra potranno essere leggeri e ricchi di particelle d'aria con densità compresa tra 50 e 100 kg/m^3 quando la temperatura dell'aria rimane inferiore a -5°C anche in prossimità del suolo, diversamente tenderanno ad essere più pesanti e umidi con densità tra 100 e 200 kg/m^3 nel caso la temperatura vicino al suolo sia prossima a 0°C .

2.1.2. Metamorfismo della neve e stabilità

Una volta caduti a terra i cristalli di neve non mantengono le stesse caratteristiche, ma subiscono una metamorfosi. I cristalli di neve avrebbero bisogno dello stesso livello di sovrasaturazione dell'aria in cui si sono formati, maggiore dei livelli presenti dove si depositano, per poter mantenere la loro dimensione o continuare a crescere. I cristalli di neve con rapporto superficie/volume maggiore sono i più instabili e tendono a cambiare rapidamente forma una volta caduti. Invece, i cristalli che più si avvicinano ad una forma sferica sono i più stabili.

La tensione di vapore è maggiore in corrispondenza di superfici convesse rispetto alle superfici concave; perciò, i rami dei cristalli tendono a subire sublimazione. A questo si aggiunge la pressione di sovraccarico degli strati di neve sovrastanti. La riduzione iniziale della dimensione dei cristalli a causa della perdita delle ramificazioni viene chiamato metamorfismo distruttivo. La distruzione delle ramificazioni dei fiocchi di neve potrebbe cominciare ad avvenire già durante il loro tragitto in atmosfera; infatti, il vento tende a distruggere le ramificazioni dei cristalli favorendo gli urti fra gli stessi.

Una volta accumulati a terra i fiocchi di neve andranno a costituire il manto nevoso, il quale verrà scaldato tramite il calore geotermico che fa sì che lo strato basale del manto nevoso, a contatto con il terreno, abbia una temperatura di circa 0°C, mentre la temperatura della superficie del manto nevoso è mediamente inferiore e varia con la temperatura dell'aria e con l'irraggiamento a cui è sottoposto. A bassa quota e/o andando verso la primavera, con l'innalzamento delle temperature, si potranno avere anche manti nevosi aventi la stessa temperatura pari a 0°C in tutto il loro spessore. La presenza di un gradiente termico all'interno del manto nevoso farà sì che si abbiano dei moti convettivi dell'aria all'interno del manto nevoso stesso, i quali permetteranno lo spostamento di vapore acqueo.

Nella neve asciutta, a causa della sublimazione, aumenta il vapore acqueo, il quale spostandosi tenderà a condensarsi favorendo la formazione di particelle di dimensione maggiore a scapito di quelle più piccole maggiormente soggette alla sublimazione. Il gradiente termico ha dunque un ruolo molto importante nel metamorfismo del manto nevoso governando la diffusione del vapore.

Nella neve con un elevato tenore d'acqua, ossia un manto nevoso costituito dal 8 – 15 % d'acqua, le particelle più grandi, soggette al rigelo notturno, cedono calore alle particelle più piccole, le quali tenderanno di conseguenza a fondersi. Dal momento che l'acqua è un conduttore migliore dell'aria, la presenza di bolle d'aria tende a rallentare il metamorfismo rallentando il flusso di calore tra i cristalli.

Se il contenuto d'acqua nel manto nevoso è di 3 -8 % si parla di neve bagnata, mentre se la percentuale d'acqua in volume è inferiore al 3 % si parla di neve umida. Grazie a una quantità d'acqua inferiore rispetto alla neve satura, nella neve umida tende a prevalere la crescita dei grani nel manto dovuta al flusso di vapore acqueo attraverso l'aria nei pori. Sotto il 7% di contenuto d'acqua tendono a formarsi legami ghiaccio-ghiaccio i quali forniscono alla neve una certa resistenza. In generale, la resistenza della neve bagnata diminuisce al crescere del contenuto d'acqua.

2.1.3. Brina di superficie

La brina di superficie è uno strato di neve debole che si forma quando la tensione di vapore dell'aria supera la tensione di vapore dei grani di neve, per sublimazione del vapore acqueo sulla superficie del manto nevoso.

Di solito la brina di superficie si forma in occasione di notti fredde e limpide con leggero movimento d'aria vicino alla superficie; in queste condizioni vi è sufficiente escursione termica tra il manto nevoso e l'aria per favorire la formazione della brina, il manto nevoso emana radiazioni a onde lunghe abbassandone la temperatura che arriverà ad essere inferiore a quella dell'aria.

La brina di superficie è estremamente fragile e per questo può venir distrutta da vento, fusione o pioggia, ma se viene ricoperta da nuova neve essa può andare a formare uno strato debole nel manto nevoso e quindi andrà a costituire un fattore predisponente alla formazione delle valanghe; infatti, la brina sepolta favorisce la propagazione degli sforzi di taglio una volta che viene applicato un carico al manto nevoso fino rottura per trazione della lastra di neve e il distacco di una valanga a lastroni. La persistenza dell'instabilità data dalla presenza dello strato di brina di superficie dipende dal suo spessore che può variare da 1 mm a qualche centimetro.

2.2. Valanghe di neve

Dopo un primo excursus sulle caratteristiche generali accomunanti tutte le valanghe a partire dalle forze a cui è sottoposto il manto nevoso e che possono portare alla sua movimentazione, si riporteranno nel Capitolo 2.2.1 le caratteristiche che distinguono una tipologia di valanga da un'altra.

Il manto nevoso, formatosi dall'accumulo di neve al suolo, è un insieme di neve, aria e di acqua se il manto non si trova a temperature abbastanza basse da mantenere l'acqua allo stato solido. Il manto nevoso sarà sottoposto all'azione di due forze: la forza di gravità e la forza peso del manto nevoso stesso. Queste forze fanno sì che il manto nevoso sia soggetto a tre meccanismi di deformazione: taglio, compressione e trazione; come mostrato in Figura 3. La compressione fa sì che il manto nevoso tenda ad assestarsi ed addensarsi, mentre il taglio porta il manto nevoso a rottura e di conseguenza alla formazione delle valanghe.

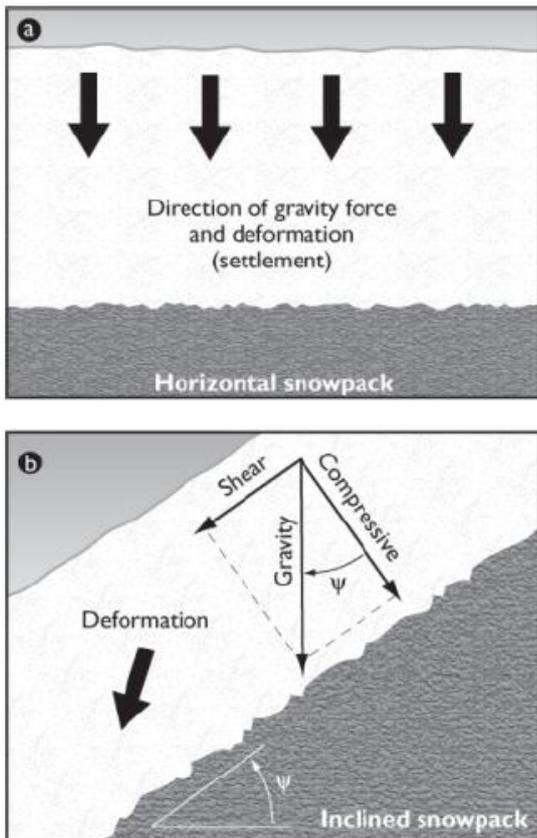


Figura 3: Deformazioni agenti sul manto nevoso (McClung & Schaerer, 1996).

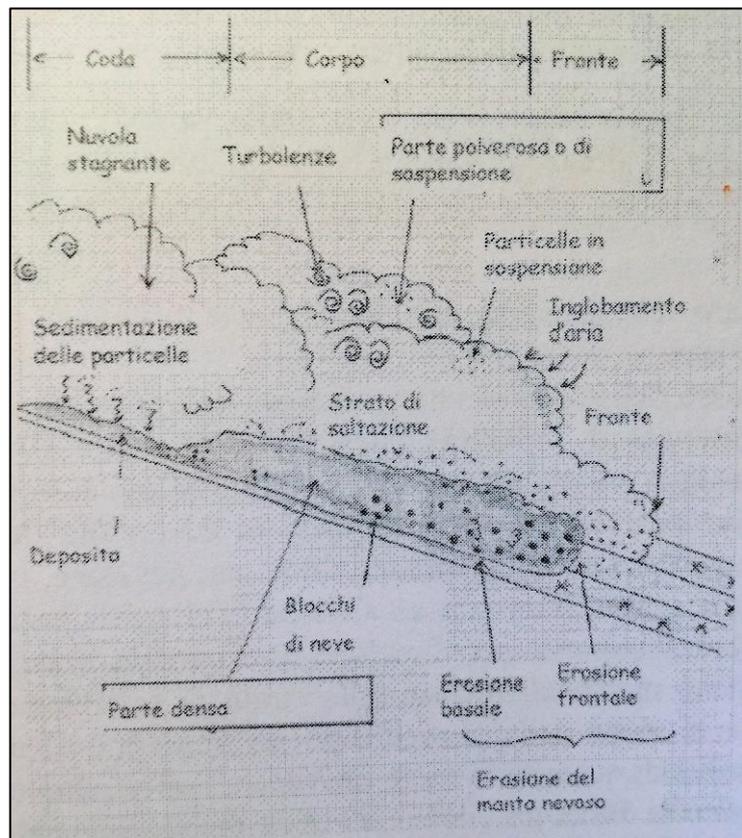


Figura 4: Schema di una valanga di tipo misto (Frigo, 2006).

In seguito alle forze a cui il manto nevoso è sottoposto esso può mettersi in movimento andando a formare una valanga; infatti, qualunque valanga di neve può essere definita come una massa di neve in movimento lungo un pendio.

Le valanghe sono costituite da tre parti: la coda, il corpo e il fronte indicate in Figura 4. Il fronte della valanga è responsabile dell'inglobamento dell'aria e dell'erosione frontale determinando la crescita in volume e in massa della valanga stessa. Il corpo della valanga segue il percorso intrapreso dal fronte, è costituito da materiale denso e granulare e da una componente polverosa costituita da aerosol. Nella coda della valanga inizia il processo di deposito di parte della neve che costituisce la valanga e solitamente la velocità della stessa è inferiore rispetto alle altre parti.

Le valanghe seguono un percorso, detto percorso valanghivo, da quando si innescano a quando si arrestano che può variare in lunghezza da pochi metri a oltre 3000 m di dislivello. Il percorso valanghivo viene suddiviso in zona di distacco, in cui si innesca la valanga per messa in movimento della neve instabile, in zona di scorrimento, in cui la valanga raggiunge la sua velocità massima e in cui può aumentare la propria massa per inglobamento della neve costituente il manto nevoso su cui sta scorrendo e di altro materiale come piante e rocce e in zona di accumulo, la quale spesso inizia nel punto in cui il pendio riduce la sua pendenza a 10° in cui la valanga subisce una rapida decelerazione fino ad arrestarsi completamente.

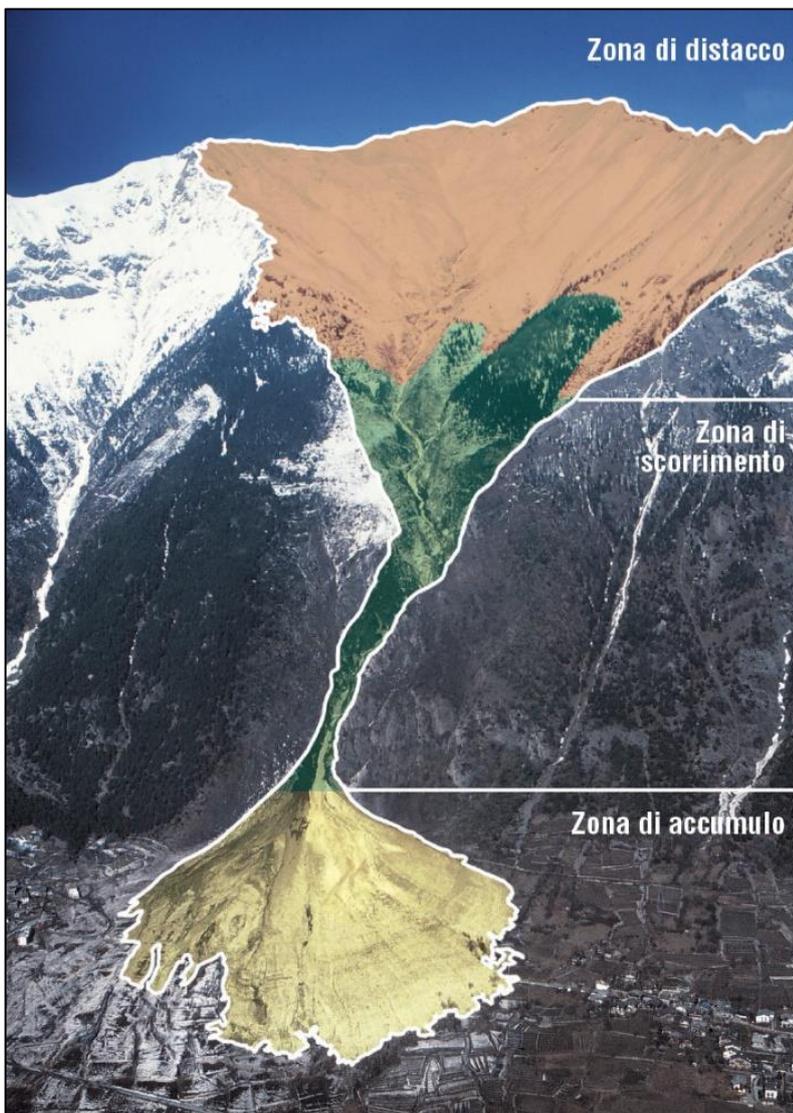


Figura 5: Vista di un percorso valanghivo di una valanga incanalata in cui si evidenziano le zone di distacco, scorrimento e accumulo (AINEVA, 2021).

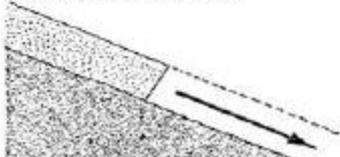
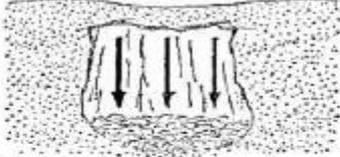
Le tre zone del percorso valanghivo precedentemente descritte e mostrate in Figura 5 sono caratteristiche per ogni singola valanga; perciò, sullo stesso pendio si possono formare valanghe aventi percorso e dimensione differenti.

In condizioni meteo e con morfologia del terreno particolari si può avere la compresenza di più aree di distacco, dette aree di distacco multiple, da cui partono più valanghe contemporaneamente le quali convoglieranno in un'unica zona di scorrimento per generare un'unica valanga di dimensioni elevate.

2.2.1. Classificazione delle valanghe

Come mostrato in Tabella 1 le valanghe possono essere classificate in base al tipo di distacco (puntiforme, che forma valanghe a debole coesione, o lineare, che forma valanghe a lastroni), alla posizione della superficie di scivolamento nel manto nevoso (valanga di fondo, in cui il piano di scivolamento è il terreno, o di superficie, in cui il piano di scivolamento è uno strato del manto nevoso), all'umidità della neve (valanga di neve asciutta o di neve bagnata, contenente acqua liquida), alle caratteristiche del terreno (incanalata o di versante, ossia su un pendio aperto) e per il tipo di movimento (radente o nubiforme).

Tabella 1: Classificazione dei fenomeni valanghivi (Vigna, 2020).

CRITERI	CARATTERISTICHE ALTERNATIVE E NOMENCLATURA	
1 TIPO DI DISTACCO	da un singolo punto  VALANGA DI NEVE INCOERENTE	da un'area estesa  VALANGA A LASTRE
	2 POSIZIONE DELLA SUPERFICIE DI SCIVOLAMENTO	dell'intero manto nevoso  VALANGA DI FONDO
3 UMIDITÀ DELLA NEVE		asciutta VALANGA DI NEVE ASCIUTTA
4 CARATTERISTICHE DEL TERRENO IN BASE AL PROFILO	pendio aperto  VALANGA NON DELIMITATA	canalone  VALANGA INCANALATA
	5 TIPO DI MOVIMENTO	nell'aria  VALANGA NUBIFORME

Le valanghe nella realtà non si riescono sempre a distinguere nettamente nelle categorie riportate in Tabella 1, ma esistono numerose situazioni intermedie. In particolare, riferendosi al grado di umidità della neve, essa può variare da asciutta a umida a fradicia in base al contenuto d'acqua. Inoltre, le valanghe possono modificare le loro caratteristiche durante la loro discesa verso valle; infatti, le valanghe si possono innescare su pendii aperti e successivamente essere incanalate, come possono avere inizialmente un moto di tipo radente per poi generare una componente nubiforme a causa della variazione della morfologia del terreno e quindi passare a essere valanghe di tipo misto, ossia aventi sia la componente radente sia la componente nubiforme.

Pur essendo tutte le valanghe definibili come una massa di neve in movimento esse possono assumere caratteristiche molto differenti. Questa diversità rende necessario illustrare singolarmente ogni tipologia di valanga, come verrà fatto nei sotto capitoli seguenti, per comprenderne le cause dell'innescò e come evolvono nel loro moto verso valle.

2.2.1.1. Valanghe di neve a debole coesione

Le valanghe di neve a debole coesione (Figura 6) possono essere sia di neve asciutta che di neve bagnata. Questo tipo di valanghe si formano negli strati più superficiali partendo da un unico punto, durante lo scorrimento della valanga altra neve tende a mettersi in movimento e infine il percorso della valanga assume una forma triangolare lungo la discesa.

La coesione del manto nevoso dipende dall'interazione fra i grani che lo costituiscono e quindi dipende dalla forma di grani e cristalli, dalla densità dei legami e quindi dalla neve. Le condizioni di neve a debole coesione sono favorite da basse temperature, assenza di vento e bassa densità del manto.

La resistenza della neve dipende anche dall'attrito fra gli strati del manto nevoso, esso dipende dalla struttura dei grani, dal contenuto d'acqua e dal peso degli strati di neve.



Figura 6: Foto di valanghe a debole coesione (McClung & Schaerer, 1996).

Le valanghe di neve asciutta a debole coesione sono costituite da neve leggera generalmente avente temperature inferiori a 0°C e densità inferiore a 100 kg/m³. Le valanghe di questo tipo, attraverso un moto turbolento, formano uno strato di aerosol, avente densità di 3 – 15 kg/m³, dato dal mescolamento della neve con l'aria che scende a velocità che possono raggiungere i 300 km/h. L'innesco della valanga è normalmente causato da una perdita puntuale di coesione a seguito di metamorfismo, il quale può essere causato da pioggia, sole o molto spesso dall'irraggiamento, e di conseguenza aumento di temperature, dovuto alla vicinanza a rocce affioranti dal manto nevoso.

Le valanghe di neve bagnata a debole coesione hanno velocità ridotte e sono costituite da neve avente una densità di 300-500 kg/m³ e temperature prossime a 0°C, sono normalmente innescate dall'aumento di contenuto d'acqua per fusione di parte del manto nevoso in seguito ad irraggiamento solare o pioggia. Infatti, la coesione della neve bagnata diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua, la quale funge da lubrificate. Queste valanghe possono raggiungere dimensioni maggiori rispetto alle valanghe di neve asciutta a debole coesione e tendono, al contrario della seconda tipologia, a trascinare durante il loro percorso neve anche a densità maggiore rispetto alle loro condizioni.

Le valanghe di neve asciutta a debole coesione si staccano con pendenze difficilmente inferiori a 30°, mentre le valanghe di neve fradicia si possono staccare anche con pendenze di 15° o meno.

2.2.1.2. Valanghe a lastroni

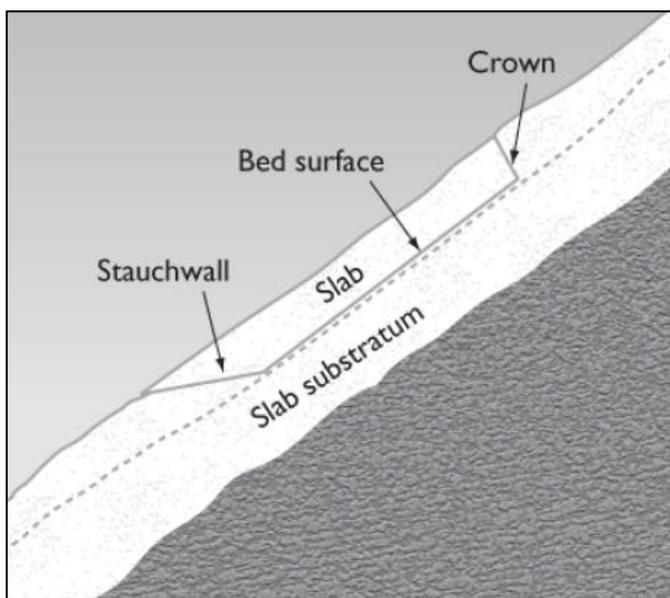


Figura 7: Sezione rappresentativa di un lastrone di neve (McClung & Schaerer, 1996).

Una valanga di neve a lastroni si forma quando uno strato di neve scorre su un piano di slittamento, il quale può corrispondere sia a uno strato di neve sia al terreno, in quest'ultimo caso si parla di valanghe di fondo. La forma di un lastrone di superficie tipo è mostrata in Figura 7.

2.2.1.2.1. Valanghe a lastroni di neve asciutta

Le valanghe di neve a lastroni si formano dove vi è neve avente densità di 200-400 kg/m³, coesione medio-alta e la presenza di piani di debolezza fra gli strati del manto nevoso.

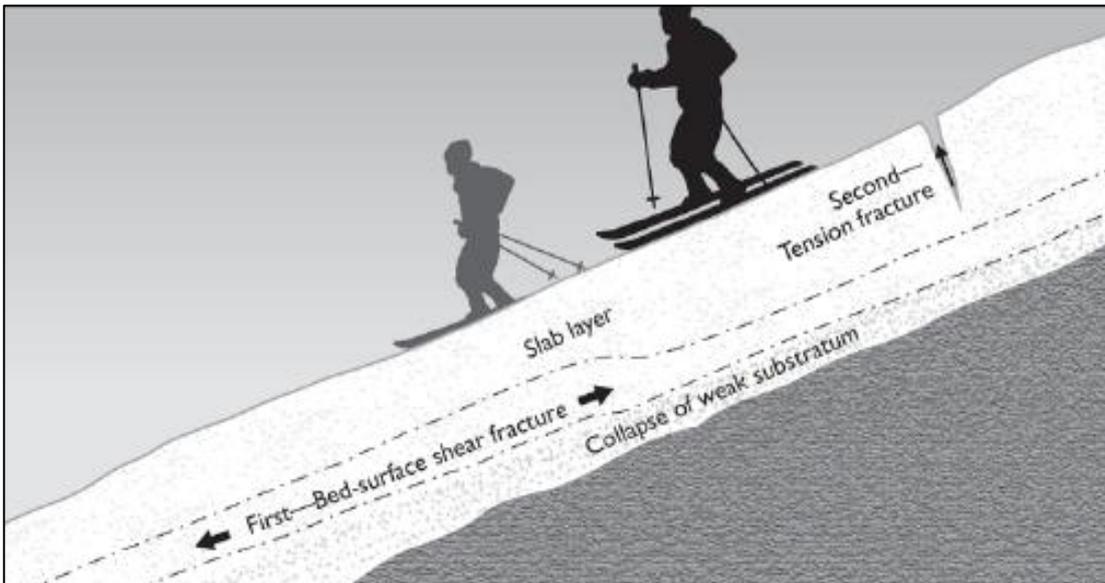


Figura 8: Schema dell'azione di un sovraccarico su un lastrone di neve (McClung & Schaerer, 1996).

L'innesco di valanghe a lastroni di neve asciutta è dovuto a un sovraccarico del lastrone a seguito di neve fresca, sciatori (Figura 8) o animali. Affinché si inneschi la valanga il carico deve generare sollecitazioni di taglio che eguagliano la resistenza al taglio e la velocità di applicazione del carico deve essere tale che la deformazione subita dallo strato debole sia abbastanza rapida da causarne la rottura. Se un carico viene applicato lentamente al manto nevoso quest'ultimo sarà in grado di dissipare le sollecitazioni sotto forma di deformazione viscosa.

Le valanghe a lastroni normalmente si formano in corrispondenza di pendii aventi un angolo di inclinazione compreso tra 25° e 55°. Per pendii a pendenza inferiori le sollecitazioni di taglio non sono sufficienti a causare il distacco di lastroni, per pendii a pendenze superiori a 55° tendono a formarsi piccole valanghe di neve a debole coesione prima che possa accumularsi una quantità sufficiente di neve da formare lastroni.

I lastroni hanno uno spessore solitamente compreso in un range compreso fra 0.1 e 2 m di spessore con valore medio dei lastroni attorno a 2/3 di 1 m.

La durezza del lastrone determina se esso tenderà o meno a rompersi subito dopo il distacco oppure no, si suddividono quindi i lastroni da soffici se aventi bassa durezza a duri se hanno elevata durezza. I lastroni duri tenderanno a propagare più facilmente la linea di frattura in quanto hanno un comportamento maggiormente rigido. I piani di scivolamento hanno durezza mediamente bassa o molto bassa.

Le dimensioni dei lastroni dipendono fortemente dalla conformazione del pendio su cui si formano: nel caso di pendii aperti privi di curvatura si tendono a formare lastroni aventi larghezza superiore della lunghezza con rapporto mediamente compreso tra 2 e 6. In pendii aventi una curvatura è favorita la formazione di lastroni di grandi dimensioni su pendii con superficie convessa a causa della maggiore facilità di propagazione della frattura.

Il meccanismo di distacco di una valanga a lastroni può essere riassunto nella successione di 4 tipologie di fratture (Frigo, 2006):

- a. Collasso dello strato debole, parziale o totale;
- b. Espansione della frattura lungo lo strato debole;
- c. Apertura della frattura in corona che determina il limite superiore del lastrone;
- d. Espansione della frattura in corona con conseguente distacco della valanga.

2.2.1.2.2. Valanghe a lastroni di neve bagnata

Le valanghe a lastroni di neve bagnata sono molto simili alle valanghe a lastroni di neve asciutta, ma a variare sono le cause del distacco del lastrone. Esse si possono innescare per tre differenti cause: tramite un sovraccarico dovuto a precipitazioni piovose oppure per l'azione di acqua di fusione o piovosa che può lubrificare la superficie di scorrimento o modificare la resistenza dello strato debole.

2.2.1.2.3. Valanghe di neve fradicia

Le valanghe di neve fradicia si verificano in caso di manto nevoso in parte o completamente saturo d'acqua su una superficie impermeabile e con pendenze che variano fra 5° e 40°, ma raramente superano i 25°-30°.

La neve fradicia ha densità molto elevata dovuto all'insieme di acqua, ghiaccio, neve e terriccio, che può raggiungere i 1000 kg/m³, a causa della quasi assenza di aria. L'elevata densità fa sì che questo tipo di valanghe causino elevati valori di pressioni di impatto nel momento in cui interagiscono con strutture durante la loro discesa.

L'innescò della valanga è normalmente associato a un rapido scioglimento della neve a seguito di aumento di temperatura e/o pioggia, l'acqua nel manto giunge o dalla fusione del manto stesso o dalle precipitazioni. L'acqua nel manto causa una riduzione della coesione e dell'attrito con conseguente movimentazione della neve.

2.3. Pendii valanghivi

La possibilità che si inneschi o meno una valanga dipende dalle caratteristiche della zona di distacco, e quindi dall'esposizione, dalla morfologia e dagli elementi presenti sul pendio su cui la valanga si origina. Come questi elementi contribuiscano al possibile innescò di una valanga verrà illustrato nel resto di questo capitolo.

2.3.1. Influenza della pendenza

Nella zona di distacco il pendio può essere assimilato a un piano di scivolamento, il quale deve avere un'inclinazione sufficientemente elevata per far in modo che l'intero manto nevoso o parte di esso si metta in movimento. Per far in modo che l'intero manto nevoso o un suo strato si metta in movimento le forze favorevoli al movimento, ossia le componenti parallele al pendio della forza di gravità e della forza peso, devono superare le forze resistenti, ossia l'attrito tra lo strato che intende muoversi e il piano di scivolamento e l'azione della coesione e dell'attrito che tengono assieme la parte di manto nevoso che vorrebbe muoversi con il manto nevoso circostante a cui è collegato.

Ogni tipologia di valanga possiede un range di valori caratteristici di inclinazione del pendio nella zona di distacco che ne favorisce l'innescò e che sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2: Tipologia di valanga che si può sviluppare in base alla pendenza della zona di distacco (McClung & Schaerer, 1996).

Pendenza zona di distacco	Tipologia valanga di cui è favorito l'innescò.
60° - 90°	Valanghe rare, frequente formazione di colate di neve di piccole dimensioni.
30° - 60°	Valanghe di neve asciutta a debole coesione.
45° - 55°	Frequenti valanghe di neve a lastroni di piccole dimensioni.
35° - 45°	Valanghe di neve a lastroni.
25° - 35°	Bassa frequenza di valanghe di neve a lastroni, ma spesso di grandi dimensioni. Valanghe di neve bagnata a debole coesione.
10° - 25°	Bassa frequenza di valanghe di neve bagnata e fradicia.

Importanti da considerare nella valutazione dei possibili punti di innescò delle valanghe sono anche i cambi di pendenza del pendio; infatti, un rapido aumento di pendenza del pendio genera una zona a curvatura convessa che fa aumentare le forze di trazione nel manto nevoso favorendo il distacco di valanghe, mentre una rapida diminuzione della pendenza genera una zona a curvatura concava in cui aumentano le forze di compressione che aumentano la stabilità del manto nevoso.

2.3.2. Influenza del vento

Il vento è causa di un forte trasporto di neve facendo sì che alcuni pendii ne rimangano quasi privi mentre altri possono avere manto nevoso di alcuni metri di spessore. Le aree soggette a maggiore accumulo eolico sono i versanti sottovento, il lato sottovento di dorsali orientate perpendicolarmente alla linea di massima pendenza, dietro file di alberi e qualsiasi avvallamento di un pendio.

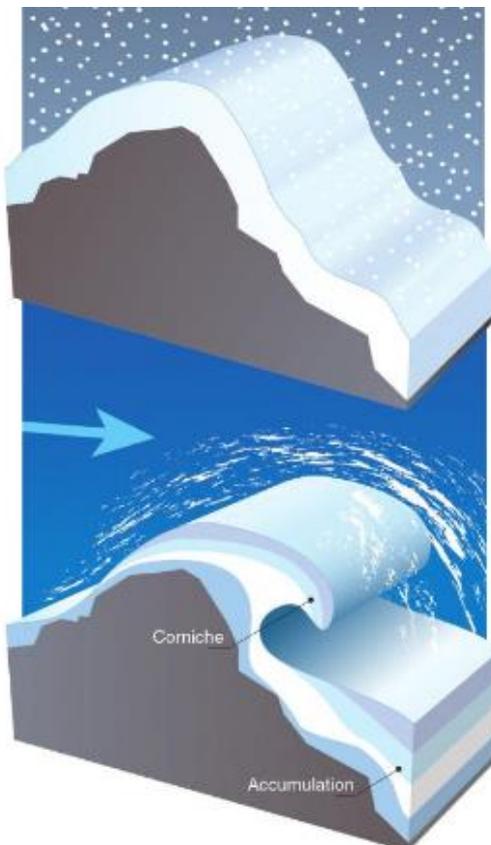


Figura 10: Formazione delle cornici di neve (Naaim-Bouvet & Richard, 2015).

Il vento è anche causa della formazione di cornici di neve, le quali sono cumuli di neve dura a sbalzo in corrispondenza delle creste (Figura 9), in aree in cui il vento ha una direzione predominante durante l'intero periodo invernale e un'intensità sufficiente, il meccanismo di formazione delle cornici è mostrato in Figura 10. Le cornici sono spesso causa di innescò di valanghe in quanto, una volta raggiunta una dimensione sufficientemente grande, crollano sul pendio sottovento generando un sovraccarico, applicato a velocità elevata, sul manto nevoso sottostante.



Figura 9: immagine di una cornice di neve (McClung & Schaerer, 1996).

2.3.3. Influenza dell'orientazione rispetto al Sole

Un pendio esposto a nord, che quindi è soggetto a poco irraggiamento solare durante l'inverso, rimane più freddo e per questo si stabilizza lentamente, con l'avanzare della primavera lo stesso pendio tende a stabilizzarsi grazie alla maggiore quantità di irraggiamento solare che riceve. Al contrario, un pendio soleggiato tende a essere maggiormente stabile nel periodo invernale grazie all'irraggiamento solare e diventa instabile in primavera a causa dell'innalzamento delle temperature che fanno aumentare il contenuto d'acqua nel manto nevoso.

2.3.4. Influenza del bosco

La presenza di un bosco su un pendio riduce la quantità di raggi solari che giungono sul terreno, intercetta nevicata e vento, dalle chiome degli alberi la neve cade a terra gradualmente andando a formare al di sotto di essi un manto nevoso eterogeneo e i tronchi fungono da strutture di trattenimento del manto.

Purché il bosco sia sufficientemente fitto, 500 alberi per ettaro circa, esso impedisce la formazione di grosse valanghe grazie all'influenza degli alberi sul manto nevoso; tuttavia, se una valanga giunge in corrispondenza di un bosco da pendii sovrastanti quando è già in movimento il bosco non sarà in grado di fermarla.

2.4. Strutture di protezione dalle valanghe

Le popolazioni che vivevano in aree soggette al rischio di caduta valanghe realizzavano i centri abitati al di fuori dei percorsi valanghivi per difendersi da questi eventi; a seguito dell'aumento dell'urbanizzazione nell'ultimo secolo, in particolar modo nelle zone turistiche, che hanno portato all'aumento della quantità di strutture e infrastrutture a rischio caduta valanghe si è dovuto provvedere a studiate sistemi efficaci per proteggersi dagli eventi valanghivi.

I primi sistemi a essere stati sviluppati sono le opere strutturali di difesa passiva, ossia si crearono delle strutture che impedissero al flusso valanghivo di raggiungere le strutture da proteggere nelle zone di accumulo. Tramite lo studio degli eventi valanghivi sono state sviluppate le opere strutturali di difesa attiva, nella zona di distacco, e le opere non strutturali, le quali si basano sulla gestione del rischio.

Di seguito verranno riportate le tipologie disponibili di opere strutturali prima di difesa attiva (Capitolo 2.4.1), strutture permanenti posizionate nella zona di distacco, e poi di difesa passiva (Capitolo 2.4.2), strutture permanenti posizionate nella zona di accumulo; infine, verranno riportate le tecniche di difesa non strutturali (Capitolo 2.4.3) che stanno prendendo sempre più piede nella gestione del rischio caduta valanghe grazie al loro minor costo.

2.4.1. Opere strutturali di difesa attiva

Le opere di difesa attiva sono opere strutturali permanenti posizionate nella zona di distacco della valanga per ridurre la probabilità di distacco della valanga stessa tramite la stabilizzazione del manto nevoso. Dato che questa tipologia di strutture viene posizionata nella zona di distacco delle valanghe, per poterle utilizzare come strumento di mitigazione del rischio da caduta valanghe, è necessario conoscere le possibili cause di innesco della valanga da cui ci si vuole proteggere; diversamente si rischierebbe di non posizionare correttamente queste opere rendendole inefficaci.

Ponti da neve, reti fermaneve e ombrelli, mostrati in Figura 11, sono tutte opere strutturali di difesa attiva che trattengono il manto nevoso, impedendo allo stesso di scorrere creando una barriera perpendicolare al pendio, e limitano la possibilità di propagazione delle fratture. Per far ciò queste strutture devono avere un'altezza almeno pari all'altezza del manto nevoso prevista più un franco di sicurezza. La distanza tra le file è funzione dell'altezza verticale prevista del manto nevoso e di un fattore di distanziamento dipendente a sua volta dalla pendenza del pendio, dall'angolo di attrito neve – suolo e da un fattore di scivolamento dipendente dalla classe di terreno.

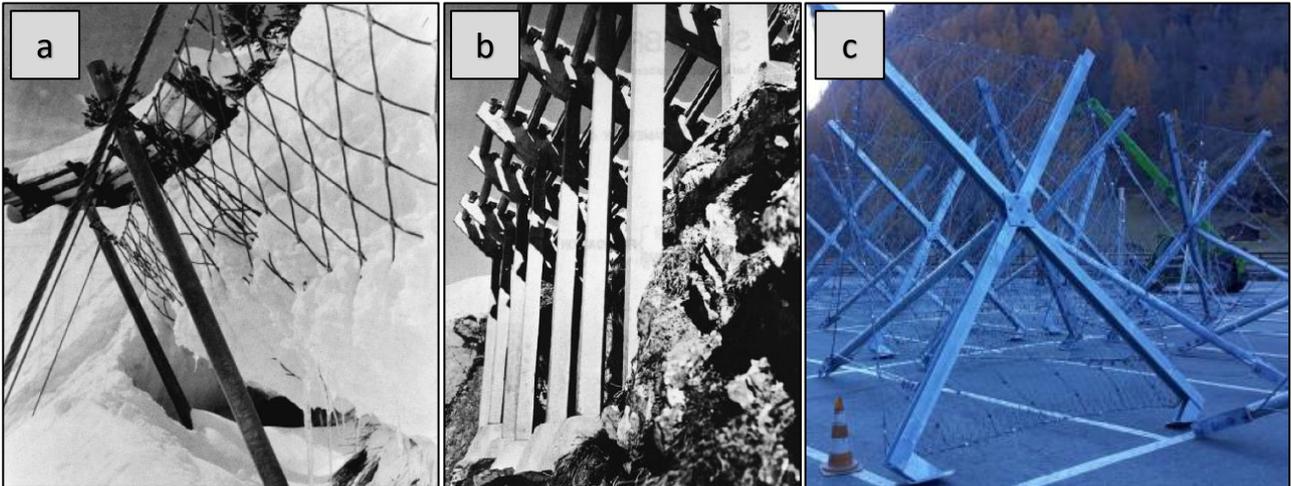


Figura 11: a) reti da neve; b) ponti da neve; c) ombrelli. (McClung & Schaerer, 1996).

Le opere frangivento, mostrate in Figura 12, vengono posizionate sul versante sopravvento delle creste per bloccare la neve prima che vada a formare le cornici di neve e per limitare il deposito di neve sul versante sottovento.

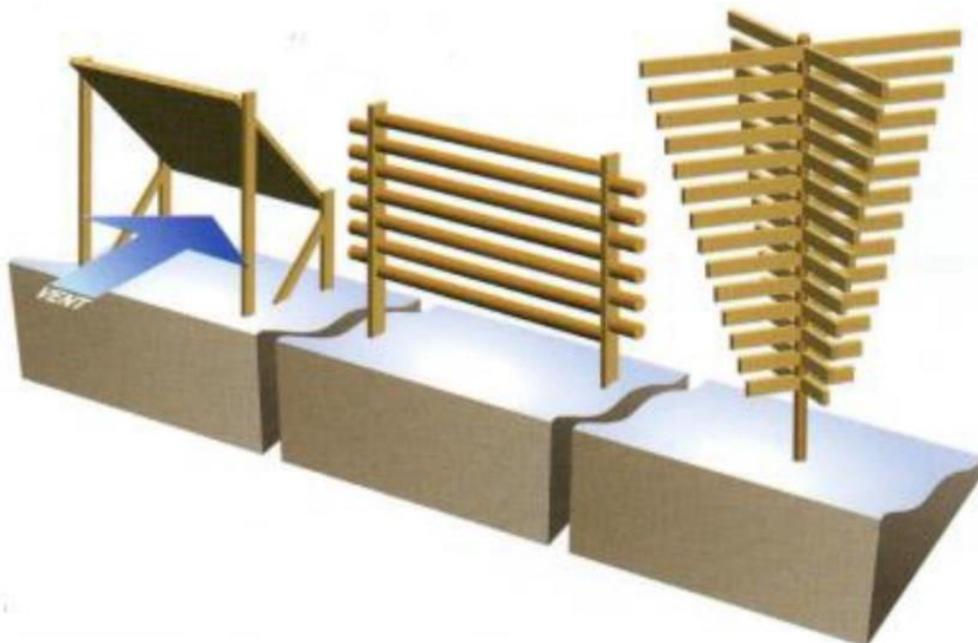


Figura 12: Rappresentazione di tre tipologie di opera frangivento (Naaim-Bouvet & Richard, 2015).

Il rimboschimento di un pendio può essere utilizzato come sistema di difesa attiva al posto dei ponti da neve, ma la zona di distacco si deve trovare a una quota tale in cui possano crescere gli alberi d'alto fusto e inoltre si devono creare opere strutturali temporanee di difesa attiva in attesa che le piante possano raggiungere una dimensione sufficiente a impedire il distacco delle valanghe.

2.4.2. Opere strutturali di difesa passiva

Le opere strutturali di difesa passiva sono opere strutturali che non impediscono il distacco della valanga, ma mirano a limitarne gli effetti in corrispondenza di strutture e infrastrutture da proteggere. Infatti, queste opere rallentano, arrestano o modificano la direzione della valanga (Agostini, 2022). Per riuscire ad utilizzare, posizionare e dimensionare correttamente questa tipologia di strutture è necessario conoscere la dinamica della valanga da cui ci si vuole difendere in quanto ne dipenderà l'efficacia o l'inefficacia dell'intervento.

Le gallerie paravalanghe vengono costruite a difesa di infrastrutture viarie sia nelle zone di scorrimento che di accumulo permettendo alla valanga di poter scorrere al di sopra senza interrompere la viabilità, come si vede in Figura 13. Sono strutture molto efficaci se adeguatamente dimensionate, ma anche molto costose.



Figura 13: Foto di una galleria paravalanghe (McClung & Schaerer, 1996).

Le opere di contenimento (Figura 14) sono ostacoli in terra, roccia e/o calcestruzzo posizionati nella zona di accumulo per rallentare la componente radente del flusso valanghivo e quindi ridurre la distanza di arresto. I cumuli devono essere posizionati il più vicino possibile l'uno all'altro e devono avere un'altezza compresa tra 5 e 8 m a seconda della valanga attesa o se ne è prevista più di una durante la stagione invernale.



Figura 14: Foto opere di contenimento in terra (McClung & Schaerer, 1996).

I cunei (Figura 15) sono barriere in calcestruzzo o terra posizionate di fronte alla struttura da proteggere o inglobate nella struttura stessa che deviano il flusso valanghivo attorno alla struttura da proteggere. La punta del cuneo deve essere posizionata in direzione del flusso valanghivo e i suoi lati vengono generalmente posizionati con un'angolazione di 60° . I cunei devono avere un'altezza tale da proteggere la struttura dalle valanghe radenti, tenendo conto anche dell'altezza di risalita del flusso valanghivo sulla struttura.



Figura 15: Foto cuneo in calcestruzzo a protezione di un traliccio (McClung & Schaerer, 1996).

Le opere di deviazione sono normalmente realizzate da argini in terra eventualmente rinforzati con gabbionate, muri in calcestruzzo o roccia che hanno lo scopo di deviare il flusso valanghivo lontano dall'area da proteggere. La struttura viene posizionata con un angolo α , indicato in Figura 16, non superiore a 20° - 30° rispetto alla direzione del flusso valanghivo in modo tale che la valanga non scavalchi l'opera di deviazione, per questo motivo le opere di deviazione hanno spesso un angolo variabile per deviare gradualmente la valanga. L'altezza dell'opera di deviazione deve tener conto dello spessore del manto nevoso atteso nella zona di posizionamento dell'opera e dell'altezza di risalita prevista della valanga sulla struttura come mostrato in Figura 18.

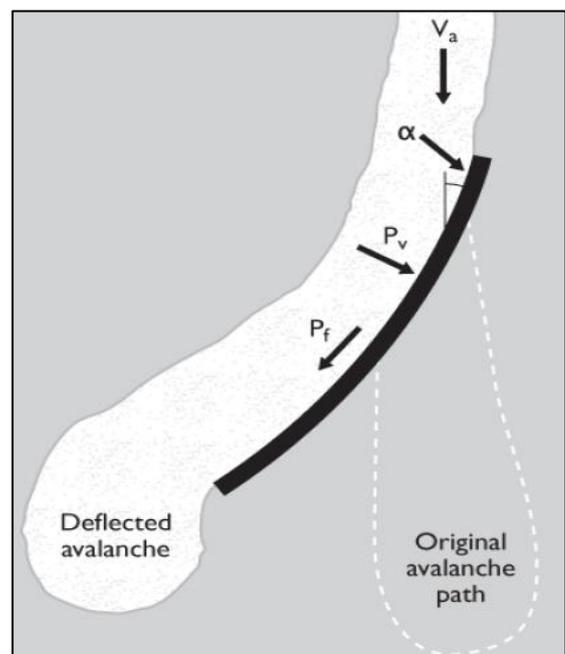


Figura 16: Schema posizionamento opera di deviazione (McClung & Schaerer, 1996).

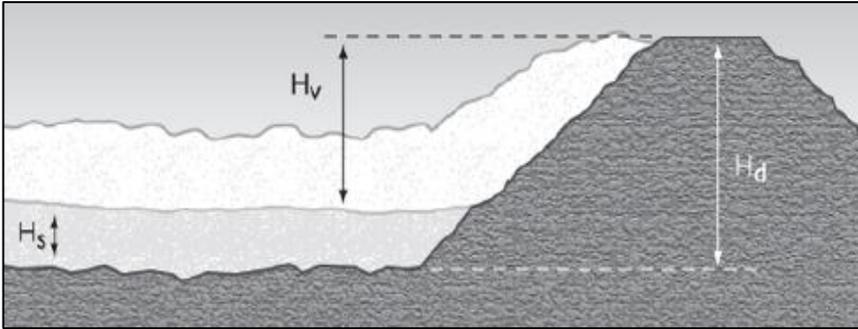


Figura 18: Schema dimensionamento opera di deviazione (McClung & Schaerer, 1996).

Le opere di arresto (Figura 17) sono argini muri o fossati posizionati perpendicolarmente al flusso valanghivo per arrestare la valanga stessa. A monte di queste strutture deve esserci un'area sufficientemente ampia a raccogliere l'intero volume valanghivo e le strutture stesse devono essere sufficientemente alte da non essere sormontate dal flusso.



Figura 17: Foto opera di arresto del flusso valanghivo (McClung & Schaerer, 1996).

2.4.3. Opere non strutturali

Le opere strutturali sono costose e per questo in molti casi si opta per opere non strutturali che possono consistere nella chiusura di infrastrutture viarie per l'intera stagione invernale o nell'intervento solo nel caso di rischio di caduta valanghe.

La chiusura delle infrastrutture viarie è una scelta che viene normalmente effettuata nel caso dei passi alpini o nel caso di strade di collegamento a villaggi abitati solo nei mesi estivi. Questa scelta permette di risparmiare i costi di qualsiasi tipo di intervento, strutturale o no, e di non avere rischi residui per le persone.

In luoghi in cui le valanghe avvengono esclusivamente lungo dei canali noti che intercettano infrastrutture viarie si può scegliere di posizionare dei sensori sincronizzati con dei semafori che rilevino quando vi sono valanghe in movimento, i sensori devono essere posizionati sufficientemente distanti dalle infrastrutture in modo tale che vi sia il tempo necessario per interrompere il traffico tramite dei semafori.

A protezione di centri abitati e infrastrutture si può anche optare per il distacco artificiale di valanghe in seguito a un'accurata valutazione del rischio valanghe. Questo sistema consiste nell'innescare artificiale di una o più piccole valanghe durante la stagione invernale impedendo che si possano generare un evento valanghivo talmente grande da poter raggiungere centri abitati o altre strutture/infrastrutture. Affinché il distacco artificiale sia efficace serve che vi sia un'attenta valutazione della stabilità del manto nevoso, se si interviene troppo presto si potrebbe non causare il distacco della valanga mentre se si interviene troppo tardi si potrebbe causare il distacco di una valanga di grandi dimensioni, e la realizzazione di un piano di sicurezza. Per evitare i rischi dati da un possibile errore il distacco deve essere effettuato dopo l'evacuazione di tutta l'area che potrebbe essere colpita da una valanga di grosse dimensioni. Il distacco artificiale di valanghe può avvenire tramite esplosivo, tramite cannoni a gas o tramite onde sonore; tutti questi metodi di innesco delle valanghe funzionano tramite l'emanazione di onde di sollecitazione elastiche che frantumano il manto nevoso. In Italia l'esplosivo è sottoposto a rigide restrizioni e controlli, chi lo utilizza deve aver frequentato specifici corsi di formazione, per questo vengono predilette le altre tecniche disponibili.

3. Dinamica e modellazione delle valanghe

Una volta compreso quali siano le tipologie di valanghe che si possono sviluppare e quali siano le cause del loro innesco è necessario andare ad analizzarne il moto lungo il percorso valanghivo.

Per poter mettere in pratica tecniche di mitigazione del rischio, come quelle illustrate nel Capitolo 2.4, e per poter definire l'azione che una valanga esercita su una struttura è necessario comprendere come le valanghe si comportino una volta che si mettono in movimento, ossia è necessario studiare la loro dinamica.

Di seguito verranno illustrate le tre categorie in cui può essere classificata la dinamica di una valanga per poi successivamente mostrare quali tipologie di modelli sono stati sviluppati nel tempo per determinare le caratteristiche che distinguono il moto di una valanga come la sua velocità e la distanza di arresto.

Per valutare la dinamica delle valanghe si suddividono le valanghe in valanghe radenti, valanghe nubiforme e valanghe di tipo misto.

Le valanghe di neve radente seguono la topografia del terreno e possono essere di neve asciutta o bagnata che comporta una densità variabile tra 200 e 500 kg/m³, hanno uno spessore compreso tra 0.3 e 3 m ed esercitano una pressione tra 10 e 1000 kPa. Le valanghe di neve bagnata sono più lente, attorno a 5-10 m/s, mentre le valanghe di neve asciutta hanno una velocità di circa 20-35 m/s.

Le valanghe di tipo nubiforme sono costituite da una prevalenza di massa in sospensione fino a circa 100 m di altezza dal suolo, per questo il loro moto non è influenzato dalla topografia del terreno e la loro densità è di solo 1-10 kg/m³. Le valanghe di tipo nubiforme si originano a partire da valanghe di tipo radente a seguito di bruschi cambi di pendenza, raggiungono distanze elevate velocità di circa 20-100 m/s e con pressioni basse pari a circa 1-20 kPa a causa della bassa densità.

Le valanghe di tipo misto sono costituite da 3 strati: la componente radente, lo strato di saltazione e lo strato di sospensione. Gli strati di saltazione e sospensione si possono muovere indipendentemente dalla componente radente grazie al fatto che sono poco influenzati dalla topografia del terreno. Gli strati radente e di sospensione presentano le stesse caratteristiche rispettivamente delle valanghe di tipo radente e delle valanghe di tipo nubiforme, mentre lo strato di saltazione presenta caratteristiche intermedie agli altri due strati: ha densità compresa tra 10 e 100 kg/m³ e uno spessore di circa 1-5 m, questo strato si muove a una velocità compresa tra 20 e 60 m/s ed esercita una pressione di circa 20-200kPa.

Lo studio della dinamica di una valanga reale viene effettuato tramite lo sviluppo di modelli. A partire dalla prima metà degli anni '50 sono state effettuate numerose ricerche che hanno portato alla nascita negli anni di numerosi modelli per le valanghe, mostrati in Figura 19, che si distinguono in due grosse famiglie: i modelli empirici e i modelli di dinamica.

I modelli empirici, illustrati nel Capitolo 3.1, analizzano gli eventi storici tramite elaborazioni statistiche andando a stimare la distanza di arresto del fenomeno, mentre i modelli fisicamente basati, illustrati nel Capitolo 3.2, studiano la fisica reale del fenomeno valanghivo andando a ricercare le caratteristiche del fenomeno fisico come la pressione d'impatto, la velocità, le altezze di scorrimento e la distribuzione del deposito. Infine, nel Capitolo 3.3 verranno illustrati alcuni codici di calcolo o software attualmente utilizzati nello studio della dinamica delle valanghe.

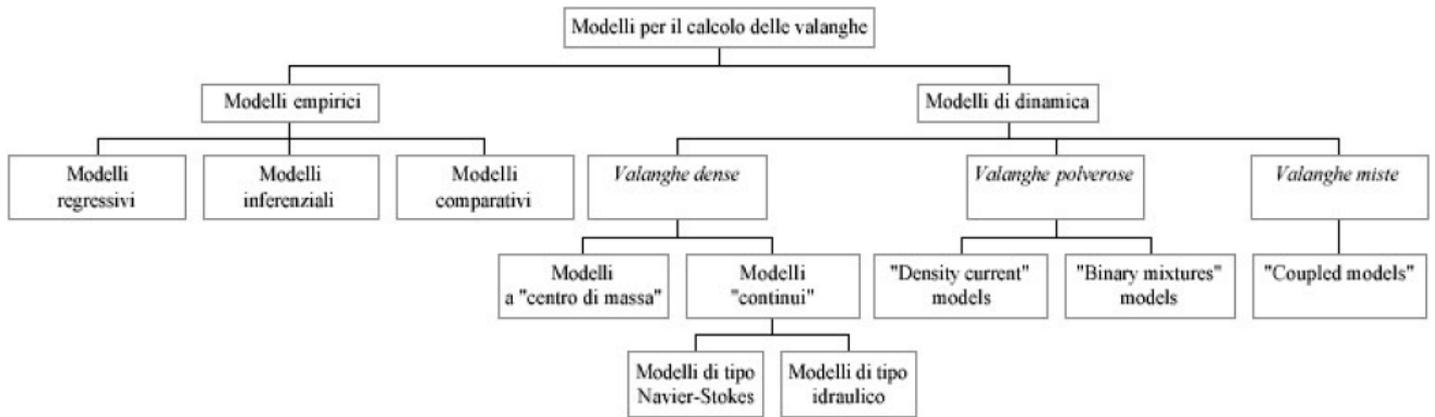


Figura 19: Schema dei modelli di calcolo per le valanghe (Frigo, 2006).

3.1. Modelli empirici

I modelli empirici sono i primi a essere stati sviluppati in quanto non cercano di riprodurre il fenomeno fisico reale per estrapolarne le informazioni utili, al contrario effettuano statistiche su dati presi da eventi storici per prevedere la dimensione dei fenomeni che si potrebbero presentare in futuro. Basandosi su dati storici i modelli empirici possono fornire una stima affidabile esclusivamente della distanza d'arresto di una valanga.

Nel tempo sono stati sviluppati tre differenti tipologie di modelli empirici: i modelli regressivi, i modelli inferenziali e i modelli comparativi; le prime due tipologie verranno descritte rispettivamente nel Capitolo 3.1.1 e nel Capitolo 3.1.2.

La terza tipologia di modello empirico è quello comparativo, questo modello si basa sull'effettuazione di una media fra le distanze d'arresto massime fra siti valanghivi che presentano caratteristiche simili (Barbolini, 2004).

3.1.1. Modelli regressivi

I modelli regressivi sono stati sviluppati tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 dai ricercatori del 'Norwegian Geotechnical Institute' (NGI) e mettono in relazione regressiva statistica le massime distanze di arresto con le caratteristiche topografiche del percorso valanghivo. Da questi modelli si giunge a stimare la massima distanza di arresto raggiungibile in un determinato sito valanghivo.

I ricercatori del NGI hanno studiato più di 200 siti valanghivi per i quali erano note le massime distanze di arresto per fenomeni aventi tempo di ritorno di 100 e 300 anni. Per la determinazione della massima distanza di arresto, identificata con l'angolo α indicante la pendenza media dal punto d'innescio alla massima distanza di arresto mostrato in Figura 20, hanno sviluppato la seguente regressione lineare:

$$\alpha = A\beta + B$$

In cui A e B sono due coefficienti di regressione, mentre β è la pendenza media della zona compresa tra il punto più alto di distacco e il punto in cui inizia la zona di arresto, ossia in cui il pendio raggiunge una pendenza di 10° , come mostrato in Figura 20.

Nel corso degli anni successivi sono stati effettuati numerosi studi nel mondo per migliorare il modello dei norvegesi che hanno portato alla modifica dei coefficienti di regressione e all'utilizzo di altri parametri topografici oltre a β .

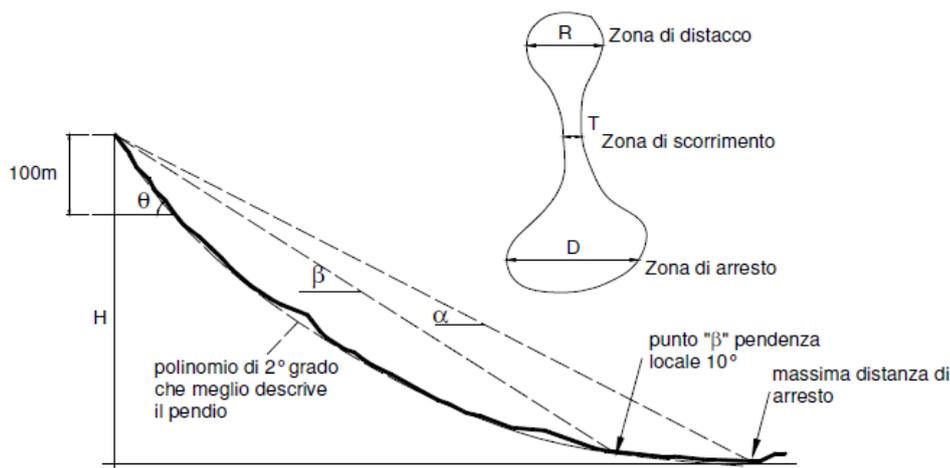


Figura 20: Parametri topografici del modello empirico regressivo dei norvegesi (Barbolini, 2004).

Il modello sviluppato dai norvegesi è stato calibrato analizzando più di 200 valanghe sul proprio territorio, le caratteristiche di questi siti valanghivi, tuttavia, non sono le stesse che si possono riscontrare in altre parti del mondo. L'esigenza di adattare il modello a territori aventi caratteristiche differenti da quelle per cui il modello era stato sviluppato ha portato alla nascita di molti nuovi modelli durante gli anni '90, i quali sono stati riportati nella Tabella 3.

Tabella 3: Modelli empirici regressivi con loro accuratezza (Barbolini, 2004).

Regioni montuose (Riferimenti)	No. di valanghe	Ipotesi	Equazioni regressive	Accuratezza	
				DS (°)	R ² (-)
Norvegia (Bakkehoi et al., 1983)	206	Tutte le valanghe	$\alpha=0,96\beta-1.4$	2,3	0,85
			$\alpha=0.92\beta-7.9*10^{-4}H+$ $+0.024Hy''\theta+0,04$	2,28	0,85
	20	H >900(m) $\beta \leq 30^\circ$	$\alpha=0.94\beta+0.035\theta-2.6$	1.02	0,81
Italia Bacino del Cordevole (Barsanti, 1990)	53	Tutte le valanghe	$\alpha=0.89\beta+0,66$	1,62	0,73
			$\alpha=0.89\beta-0.62H\beta y''+$ $+27.36Hy''-2.6$	1,31	0,82
Canada (McClung&Mears, 1991)	126	Tutte le valanghe	$\alpha=0.93\beta$	-	0,75
Alaska (McClung&Mears, 1991)	52	Tutte le valanghe	$\alpha=0.74\beta+3.67$ ($\alpha=0.86\beta$)	-	0,58
Sierra Nevada (McClung&Mears, 1991)	90	Tutte le valanghe	$\alpha=0.67\beta+2.5$ ($\alpha=0.76\beta$)	-	0,6
Colorado (McClung&Mears, 1991)	130	Tutte le valanghe	$\alpha=0.63\beta+4.68$ ($\alpha=0.8\beta$)	-	0,5
			$\alpha=0,5\beta+0,35\theta-1.01$	3.8	0.63
Giappone (Fujisawa et. Al., 1993)	66	Tutte le valanghe	$\alpha=0.92\beta+490.4y''-1.49$	-	0.98
Italia Val di Rabbi (Castaldini, 1994)	54	Tutte le valanghe	$\alpha=0.87\beta+1,71$	1,86	0,85
			$\alpha=0,94\beta-0,36H\beta y''+4,36\theta\beta y''+$ $+6,89*10^{-5}H\beta-1,77$	1,45	0,91
Austria (Lied et. al., 1995)	80	Tutte le valanghe	$\alpha=0.946\beta-0.83$	1,5	0,92
			$\alpha=0,97\beta-0,6*10^{-6}Hy''\theta-0,032y''-$ $0,07\theta+1,54$	1,3	0,94
		$\beta < 25^\circ$	$\alpha=1,14\beta-4.66$	0,87	0,77
Francia (Adjel, 1995)	168	Tutte le valanghe	$\alpha=0.82\beta+2.82$	2.69	0,66
Islanda (Johannesson, 1998)	45	Tutte le valanghe	$\alpha=0.85\beta$	2,3	0,71
Pirenei Catalani (Furdada et al., 1998)	216	Tutte le valanghe	$\alpha=0.97\beta-1.2$	1.74	0,87
			$\alpha=0.86\beta+1.05$	1.98	0.75
Valtellina (Fellini, 1999)	94	Tutte le valanghe	$\alpha=0.943\beta$	1.4	0,92
			Valle di Livigno	$\alpha=0.882\beta$	1.93

3.1.2. Modelli inferenziali

I modelli inferenziali adattano su un campione di distanze di arresto una legge di distribuzione di probabilità. Inizialmente questi modelli venivano realizzati a scala regionale considerando quindi molti siti di cui venivano presi i dati della sola massima distanza di arresto, mentre successivamente sono stati applicati anche a livello puntuale del singolo sito valanghivo. Prendendo in esame il singolo sito valanghivo vengono presi i dati relativi non solo alla distanza di arresto massima, ma anche le altre distanze di arresto sullo stesso sito valanghivo, in modo tale da ottenere una correlazione tra distanza di arresto e tempo di ritorno del fenomeno.

Per descrivere la distanza di arresto viene introdotto, rispetto ai modelli regressivi, un parametro adimensionale chiamato rapporto d'arresto (RR):

$$RR = \frac{\Delta X}{X_\beta} = \frac{\tan \beta - \tan \alpha}{\tan \alpha - \tan \delta}$$

In cui δ è l'inclinazione media della zona di arresto, X_β è lo sviluppo orizzontale della zona attiva e ΔX è lo sviluppo orizzontale della zona di arresto. I parametri topografici del modello sono riportati in Figura 21.

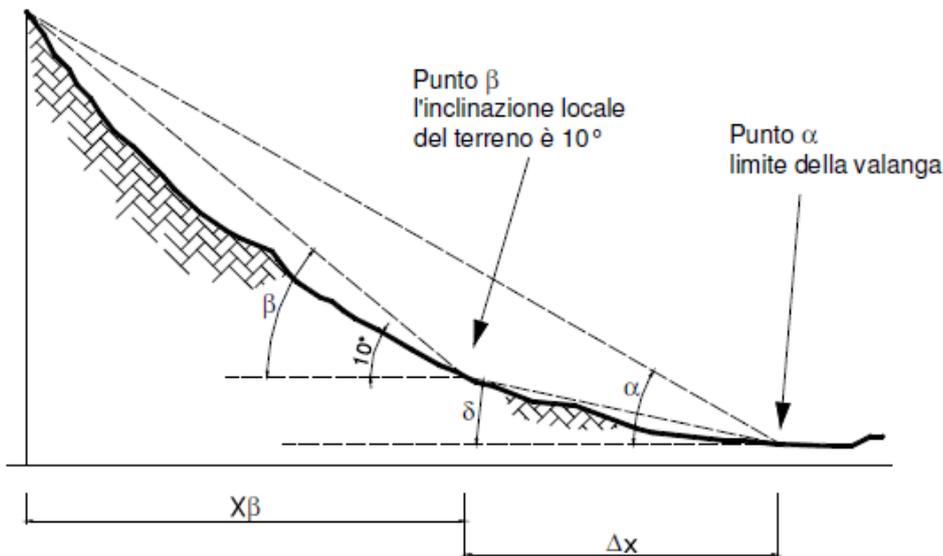


Figura 21: Parametri topografici del modello empirico inferenziale (Barbolini, 2004).

La probabilità di non superamento P di una determinata soglia viene espressa dalla legge di distribuzione di Gumbel perché ben si è osservato che si adatta a diverse regioni montuose:

$$P(RR) = \exp\{-\exp[-a(RR - u)]\} \quad \text{con} \quad a = \frac{1.2825}{s[RR]} \quad e \quad u = \overline{RR} - 0.45 \cdot s[RR]$$

Fissando P in base al rischio accettabile è possibile determinare il rapporto d'arresto e , una volta determinato X_β che è sito specifico, stabilire la massima distanza di arresto attesa.

Si è osservato che i valori di 'a' e 'u' variano a seconda della regione presa in esame per lo sviluppo del modello.

Nei modelli inferenziali sito specifici si ricerca una correlazione tra tempi di ritorno degli eventi valanghivi e distanze di arresto superando la limitazione sia dei modelli regressivi sia dei modelli inferenziali regionali in cui viene ricercata ed analizzata la sola distanza di arresto massima.

I dati relativi alle distanze di arresto del sito valanghivo in esame vengono analizzate utilizzando il parametro 'X' (Figura 22) che rappresenta la proiezione orizzontale della distanza complessiva percorsa dalla valanga. Una volta scelto il valore soglia del parametro X, preso normalmente pari alla distanza fino al punto di inizio della zona di arresto, si calcola il numero di eccedenze o valore medio di superamenti della soglia per anno:

$$\lambda = \frac{m}{M}$$

In cui 'm' è il numero di eventi valanghivi che hanno superato il valore soglia, mentre 'M' è il numero di anni di riferimento delle eccedenze.

Il parametro 'X' è una variabile casuale con funzione di probabilità cumulata $P_e(X)$; perciò, la distanza soglia verrà superata in media una volta ogni 't' eventi e quindi, contando 'λ' superamenti per anno, ogni 'T' anni:

$$T(x) = \frac{t(x)}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{1 - P_e(x)}$$

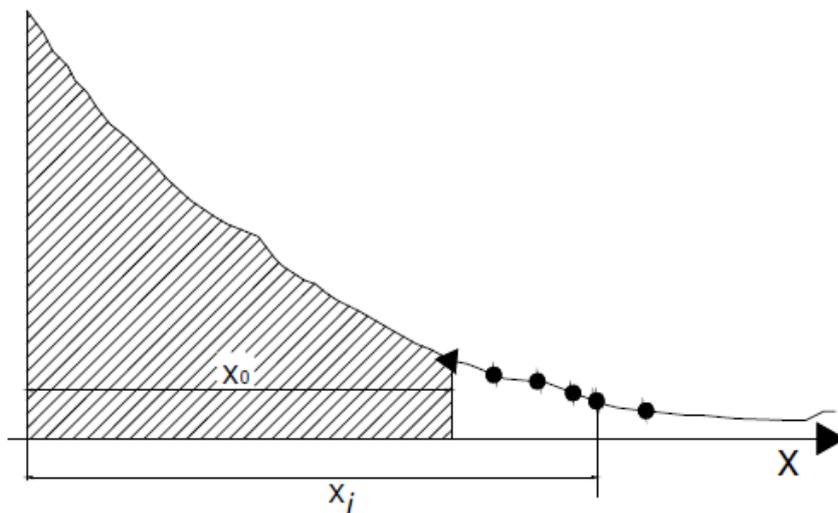


Figura 22: Schema delle eccedenze nelle distanze percorse dalle valanghe nel modello empirico inferenziale sito specifico (Barbolini, 2004).

3.2. Modelli fisicamente basati

Per la realizzazione e la scelta dei modelli di dinamica delle valanghe serve, dal momento che viene studiata la fisica reale del fenomeno, distinguere il tipo di valanga studiata e quindi se si tratta di una valanga di neve densa o di una valanga di neve polverosa o di una valanga di tipo misto.

I modelli per valanghe di neve densa si distinguono in modelli 'a centro di massa', illustrati nel Capitolo 3.2.1, e modelli di tipo 'continuo', illustrati nel Capitolo 3.2.2. Per le valanghe di neve polverosa si utilizzano modelli monofase, 'density current models' in cui si studia la sola componente aeriforme, e modelli bifase, 'binary mixture models' in cui la componente solida e la componente aeriforme vengono analizzate separatamente seguendo le equazioni di conservazione della quantità di moto e di conservazione della massa. I modelli per le valanghe polverose si sono cominciati a sviluppare tra la fine degli anni '90 e l'inizio degli anni '00.

I modelli fisicamente basati, come per quelli di seguito descritti, permettono di determinare, oltre alla distanza d'arresto come per i modelli empirici, anche la velocità del flusso da cui, conoscendo la probabile densità della valanga, si può determinare la probabile pressione d'impatto esercitata dalla stessa.

3.2.1. Modelli a centro di massa

I modelli 'a centro di massa' studiano il moto della valanga analizzando il moto del solo baricentro lungo una traiettoria predefinita rappresentante il percorso valanghivo, si effettua quindi un'analisi puntuale in cui la posizione del baricentro istante per istante viene definita dall'ascissa curvilinea.

Questi modelli utilizzano la legge di conservazione della quantità di moto per descrivere la dinamica del sistema:

$$F_{ext}(t) = \frac{d}{dt} [M(t)V(t)] = V(t) \frac{dM(t)}{dt} + M(t) \frac{dV(t)}{dt}$$

In cui $M(t)$ e $V(t)$ rappresentano rispettivamente la massa della valanga e la velocità del baricentro all'istante 't', mentre $F_{ext}(t)$ rappresenta la risultante delle forze esterne che agiscono sulla valanga.

Ipotizzando che la massa sia costante lungo tutto il percorso valanghivo la legge di conservazione della quantità di moto diventa pari alla legge fondamentale della dinamica riportata di seguito:

$$F_{ext}(t) = M \cdot a(t)$$

In cui $a(t)$ è l'accelerazione della valanga all'istante 't'.

Di seguito verranno illustrati tre differenti approcci del modello a centro di massa: il modello PCM, il modello Voellmy e il modello VS.

3.2.1.1. Modello PCM

Il modello PCM, il cui nome sta per Perla-Cheng-McClung ossia gli autori del modello, permette di calcolare la velocità e la distanza di arresto della valanga basandosi sull'equazione di conservazione di quantità di moto espressa rispetto alla derivata spaziale anziché alla derivata temporale:

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = V(t) \cdot \frac{d}{ds}$$

In cui 's' è l'ascissa curvilinea.

Le forze esterne vengono espresse come differenza tra la forza peso e le forze resistenti:

$$F_{ext} = Mg \sin \theta - R = Mg \sin \theta - [Mg \cos \theta \cdot \mu + kV^2]$$

In cui ' μ ' e ' k ' sono rispettivamente il coefficiente di attrito coulombiano e il coefficiente di attrito turbolento, mentre ' θ ' è la pendenza del pendio.

La legge di conservazione della quantità di moto può quindi essere scritta:

$$\frac{1}{2} \frac{dV^2}{ds} = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) - \left(\frac{D}{M}\right) V^2 \quad \text{con} \quad D = \left(\frac{k + dM}{ds}\right)$$

' M/D ' è un parametro chiamato 'mass to drag ratio' caratteristico del modello.

Il modello è ritenuto valido dai suoi autori purché μ abbia valori compresi tra 0.1 e 0.5 e il mass drag ratio deve avere valori compresi tra 10^2 e 10^4 .

Per poter applicare tale modello il percorso valanghivo viene suddiviso in segmenti aventi pendenza ' θ ' approssimativamente costante, come mostrato in Figura 23. Per ogni segmento di lunghezza ' L_i ' si calcola la velocità alla fine del segmento V_i^B conoscendo la velocità all'inizio del segmento stesso V_i^A , il valore di V_i^A del

primo segmento a monte sarà pari a '0' e i V_i^A dei segmenti successivi saranno pari a V_{i-1}^B con la dovuta correzione per la differente pendenza del segmento successivo.

$$V_i^B = \left[\alpha_i \left(\frac{M}{D} \right)_i (1 - \exp \beta_i) + (V_i^A) \exp \beta_i \right]^{0.5} \quad \text{con} \quad \alpha_i = g(\sin \theta_i - \mu_i \cos \theta_i) \quad \text{e} \quad \beta_i = - \frac{2L_i}{\left(\frac{M}{D} \right)_i}$$

$$V_{i+1}^A = V_i^B \cos(\theta_i - \theta_{i+1})$$

La distanza di arresto, calcolata dall'inizio del segmento i-esimo in cui avviene l'arresto del moto valanghivo, sarà pari a:

$$S = \left[\frac{(M/D)_i}{2} \right] \ln \left[1 - \frac{V_i^{A2}}{\alpha_i (M/D)_i} \right]$$

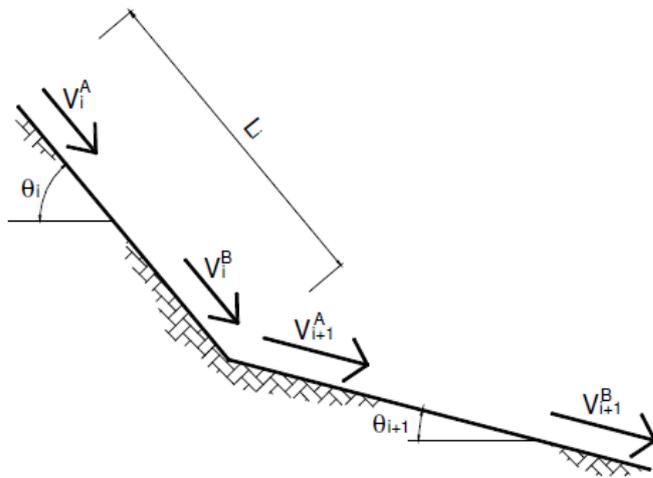


Figura 23: Schema rappresentativo caratteristiche di due segmenti del percorso valanghivo per il modello PCM (Barbolini, 2004).

3.2.1.2. Modello di Voellmy

Il modello di Voellmy suddivide il percorso valanghivo in due tratti rettilinei corrispondenti rispettivamente alla zona di scorrimento e alla zona di arresto, come mostrato in Figura 24, semplificando fortemente la geometria del pendio. Nella zona di scorrimento il modello assimila la valanga a un fluido incomprimibile e infinitamente esteso in condizioni di moto stazionario; perciò, aventi le stesse caratteristiche di una corrente idraulica stazionaria a pelo libero.

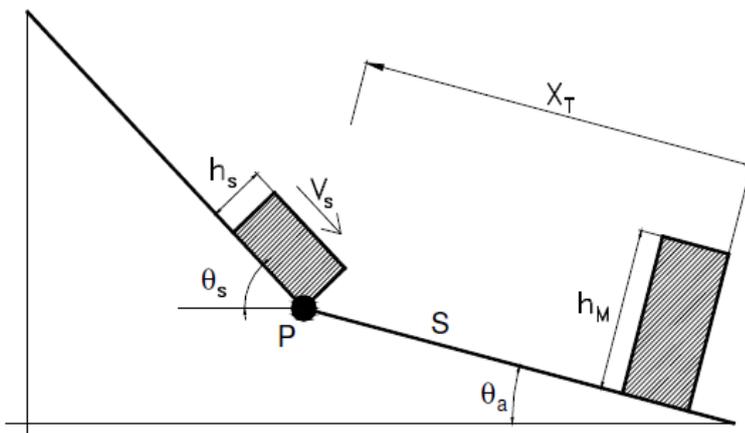


Figura 24: Schema del percorso valanghivo per il modello di Voellmy (Barbolini, 2004).

Nella zona di scorrimento si ipotizza che la valanga raggiunga una velocità limite dopo un breve tratto in accelerazione. Nel modello ci si va a riferire a una singola colonnina di sezione unitaria del flusso valanghivo:

$$f_D = \rho g h_s \sin \theta_s = f_R$$

In cui 'h_s' e 'ρ' sono rispettivamente l'altezza di scorrimento del flusso, misurata perpendicolarmente al pendio, e la densità del flusso valanghivo, 'θ_s' è la pendenza media della zona di scorrimento, 'f_D' è la componente parallela al pendio della forza peso e 'f_R' è l'insieme delle forze resistenti.

Le forze resistenti, ossia le forze di attrito, si calcolano:

$$f_R = \frac{\rho g}{\xi} V_s^2 + \mu \rho g h_s \cos \theta_s$$

In cui 'ξ' e 'μ' sono rispettivamente il coefficiente di attrito turbolento (Chezy) e il coefficiente di attrito Coulombiano. 'μ' dipende principalmente dalle caratteristiche della neve come temperatura, densità e contenuto d'acqua, mentre l'attrito turbolento è causato dai vortici turbolenti generati dalle asperità della superficie di scorrimento della valanga come rugosità, canalizzazione e vegetazione. L'attrito viscoso viene invece trascurato. 'ξ' e 'μ' diventano dunque i parametri da scegliere per la taratura del modello di Voellmy in base alle caratteristiche fisiche del fenomeno in esame.

La velocità limite nella zona di scorrimento viene calcolata:

$$V_s = \{\xi h_s (\sin \theta_s - \mu \cos \theta_s)\}^{0.5}$$

Nel caso di moto incanalato e non di versante si utilizza al posto di 'h_s' il raggio idraulico.

Nella zona di arresto il moto della valanga viene assimilato al moto decelerato di un corpo rigido e la distanza di arresto 'X_R' viene calcolata tramite un bilancio energetico, in cui si eguaglia il lavoro dell'attrito turbolento e dell'attrito coulombiano alla diminuzione di energia cinetica e potenziale.

$$X_R = \frac{V_s^2}{\left[2g(\mu \cos \theta_a - \sin \theta_a) + \frac{V_s^2 g}{\xi h_m} \right]}$$

In cui 'h_m' è pari all'altezza media del deposito.

3.2.1.3. Modello analitico Voellmy-Salm (VS)

Il modello analitico VS è un modello di tipo puntuale che analizza il moto della valanga come se fosse un moto turbolento stazionario di una corrente idraulica in un canale a pelo libero. Il percorso valanghivo viene suddiviso in tre parti a pendenza costante corrispondenti rispettivamente alla zona di distacco, alla zona di scorrimento e alla zona di arresto (Figura 25); nelle tre parti le caratteristiche dinamiche di scorrimento del flusso valanghivo vengono determinate tramite le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto.

Ogni segmento del percorso valanghivo avrà altezza di scorrimento, velocità, larghezza e pendenza media caratteristici, mentre si ipotizza che la portata Q sia costante lungo l'intero percorso e che la si può ottenere dalla seguente formula in cui 'W' è la larghezza del tratto considerato: $Q = WHV$.

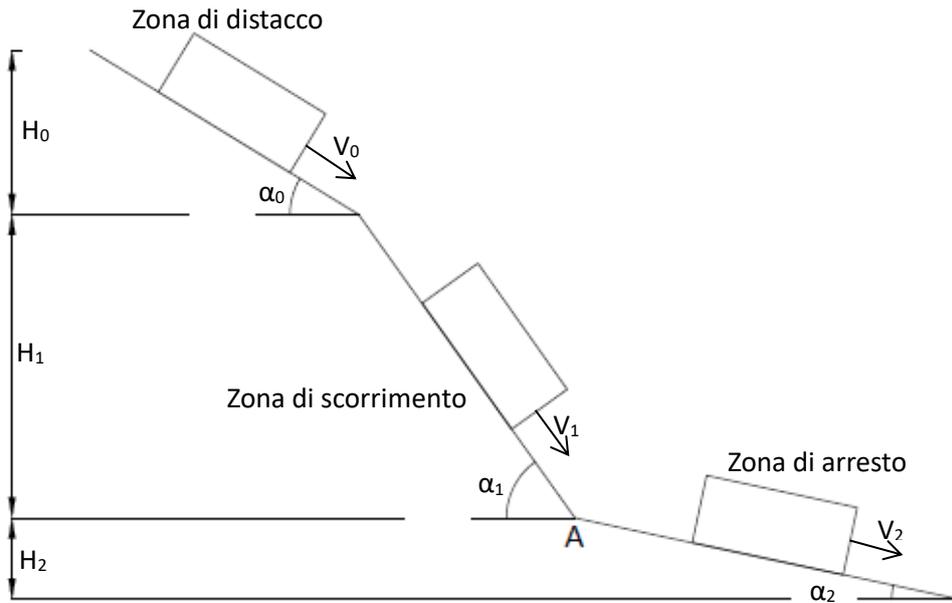


Figura 25: Schema percorso valanghivo per il modello Voellmy-Salm.

Ipotizzando una forma rettangolare della valanga si ottiene la velocità del flusso nella zona di distacco:

$$V_0 = \sqrt{H_0 \xi (\sin \alpha_0 - \mu \cos \alpha_0)}$$

In cui ξ e μ sono rispettivamente il coefficiente di attrito turbolento dipendente dalla rugosità del percorso valanghivo e proporzionale al quadrato della velocità del flusso e il coefficiente di attrito coulombiano dipendente dalla pressione perpendicolare al terreno esercitata dalla valanga e dalle caratteristiche del manto nevoso su cui la valanga stessa scorre.

Si determina il punto A, ossia il passaggio tra la zona di scorrimento e la zona di arresto:

$$\alpha_k - \mu \cos \alpha_k = 0$$

Ipotizzando di modellare una valanga di versante si determinano la velocità e l'altezza del flusso nella zona di scorrimento:

$$V_1 = \sqrt[3]{\frac{Q}{W_1} \xi (\sin \alpha_1 - \mu \cos \alpha_1)}; \quad H_1 = \frac{Q}{W_1 V_1}$$

Note le caratteristiche dei primi due segmenti della valanga si determinano velocità e altezza del flusso valanghivo nella zona di arresto e infine si determina la distanza di arresto (S):

$$H_2 = H_1 + \frac{V_1^2}{10g}; \quad V_2 = \sqrt{H_2 \xi (\sin \alpha_2 - \mu \cos \alpha_2)}$$

$$S = \frac{H_2 \xi}{2g} \ln \left[1 + \frac{V_1^2}{V_2^2} \right]$$

I vantaggi di questo modello è che permette di ottenere una buona stima della distanza di arresto, in particolar modo per valanghe di tipo catastrofico di cui si ha una taratura affidabile dei parametri ' μ ' e ' ξ '; al contrario tende a fornire una sovrastima dell'altezza dello strato di scorrimento e della velocità del flusso, inoltre la stima dell'altezza del deposito nella zona di accumulo non è realistico (Sauermoser, Rudolf-Miklau e Margreth, 2015).

3.2.2. Modelli continui

I modelli di tipo continui analizzano il moto valanghivo tramite le equazioni differenziali di conservazione della massa e della quantità di moto, studiando l'evoluzione del fenomeno valanghivo nel tempo e nello spazio.

La massa di una valanga può aumentare da 2 a 12 volte la massa iniziale durante la sua discesa tramite l'erosione. L'erosione esercitata da una valanga è di tre tipi: l'erosione frontale di neve a bassa densità e non coesa su uno strato più resistente, l'erosione a scalini quando nel manto nevoso si alternano strati a diverso grado di resistenza e l'erosione basale che agisce sugli strati più resistenti del manto.

La legge di conservazione della massa è:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \dot{q}_{raccolta} - \dot{q}_{depositata}$$

In cui 't' e 'x' sono rispettivamente la variabile tempo e la variabile distanza lungo il percorso valanghivo, mentre ' $\dot{q}_{raccolta}$ ' e ' $\dot{q}_{depositata}$ ' sono la variazione volumetrica della massa della valanga. 'A' è l'area della sezione della valanga perpendicolare alla direzione del flusso e 'Q' è la portata media del flusso valanghivo, 'A' e 'Q' si calcolano come segue:

$$A(x, t) = W(x)h(x, t); \quad Q(x, t) = A(x, t)U(x, t)$$

In cui 'W' e 'h' sono rispettivamente l'altezza e la larghezza del flusso valanghivo, mentre 'U' è la velocità del flusso.

La legge di conservazione della quantità di moto è:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha(x, t) \frac{Q^2}{A} \right] + \lambda g A \frac{\partial h}{\partial x} \cos \psi = A [g \sin \psi - g F_f - F_e]$$

In cui ' λ ' è il coefficiente di spinta attiva/passiva che tiene conto dell'attrito dovuto alle deformazioni longitudinali, ' $\alpha(x, t)$ ' è il fattore di velocità, ' $\psi(x)$ ' è la pendenza, ' F_f ' è la forza di attrito e ' F_e ' è la frizione dovuta alla neve inglobata nel flusso lungo il percorso.

3.3. Codici di calcolo per lo studio della dinamica delle valanghe

Tutti e tre i software di seguito illustrati si basano su modelli fisicamente basati; infatti, essi cercano di riprodurre il più verosimilmente possibile il fenomeno valanghivo in studio, anche tramite l'ausilio di DTM (Digital Terrain Model), in modo da ottenere informazioni sul fenomeno il più possibile affidabili. I software attualmente in uso consentono di determinare la distanza d'arresto, la velocità, la pressione e l'altezza del flusso.

3.3.1.1. Modello AVAL 1

Il modello AVAL 1, sviluppato dal 'Institute for Snow and Avalanche Research SLF', è la versione numerica del modello VS, si basa quindi su un modello a centro di massa. Nei calcoli viene introdotta la massa della valanga e si utilizza un profilo realistico del percorso valanghivo. AVAL-1D contiene al suo interno due modelli di calcolo: SL-1D per le valanghe nubiformi e FL-1D per le valanghe radenti; ma entrambi si basano sulla soluzione di equazioni differenziali della conservazione della massa, del momento e dell'energia.

Il modello FL-1D ipotizza che gli sforzi tangenziali interni alla valanga siano nulli e che quindi il profilo di velocità lungo la verticale sia costante ottenendo:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0; \quad \alpha(x, t) = 1$$

Le deformazioni longitudinali che causano la formazione di stati attivi di tensione e stati passivi di compressione dipendono dall'angolo di attrito interno del materiale 'ϕ' il quale è compreso tra 20° e 40°:

$$\left. \begin{matrix} \lambda_a \\ \lambda_p \end{matrix} \right\} = \tan^2 \left(45^\circ \pm \frac{\phi}{2} \right)$$

Si ipotizza che non vi sia erosione e che quindi F_e sia nullo. La forza di attrito viene calcolata tenendo conto dalla componente turbolenta e della componente dinamica di cui i coefficienti di attrito sono riportati in Tabella 4:

$$F_f = \mu \cos \varphi + \frac{u^2}{\xi h}$$

Tabella 4: Valori dei coefficienti di attrito per il modello AVAL-1 (AINEVA & SLF, 2002).

Dimensione valanga	Topografia percorso valanghivo	Altitudine (m s.l.m.)	Tempo di ritorno			
			300 anni		30 anni	
			μ	ξ	μ	ξ
> 60 000 m ³	Di versante	> 1500	0.16	2500	0.17	2000
		1000 – 1500	0.18	2000	0.19	1750
		< 1000	0.20	1750	0.21	1500
	Canalizzata	> 1500	0.20	1750	0.21	1500
		1000 – 1500	0.25	1500	0.26	1500
		< 1000	0.30	1200	0.31	1200
	Fortemente canalizzata	> 1500	0.30	1000	0.31	800
		1000 – 1500	0.34	750	0.35	600
		< 1000	0.38	500	0.39	400
25 000 – 60 000 m ³	Di versante	> 1500	0.20	2000	0.21	1750
		1000 – 1500	0.24	1500	0.25	1500
		< 1000	0.28	1200	0.29	1200
	Canalizzata	> 1500	0.26	1200	0.27	1200
		1000 – 1500	0.29	1200	0.31	1200
		< 1000	0.33	1000	0.34	1000
	Fortemente canalizzata	> 1500	0.33	1000	0.34	800
		1000 – 1500	0.37	800	0.38	600
		< 1000	0.40	500	0.41	400
< 25 000 m ³	Di versante	> 1500	0.30	1500	0.31	1200
		1000 – 1500	0.32	1200	0.33	1200
		< 1000	0.34	1200	0.35	1000
	Canalizzata	> 1500	0.32	1200	0.33	1000
		1000 – 1500	0.34	1000	0.35	800
		< 1000	0.36	800	0.37	600
	Fortemente canalizzata	> 1500	0.36	800	0.37	600
		1000 – 1500	0.40	500	0.41	400
		< 1000	0.42	500	0.43	400

Il modello SL_1D prende in considerazione gli strati di saltazione e aeriforme della valanga, ma non considera la componente radente. Questo è un modello quasi bidimensionale che si basa sulle equazioni di equilibrio della massa e del momento dei due strati costituenti la valanga.

Vengono determinati, trascurando l'espansione laterale, i valori medi lungo la verticale di velocità, densità e pressione dallo studio di profili misurati in laboratorio ottenuti da modelli di tipo idraulico.

L'utilizzo dei profili ricavati in laboratorio permette la determinazione degli scambi di massa e di momento tra i due strati. Per ogni strato vengono anche considerate le equazioni di bilancio dell'energia cinetica e di altezza di ogni strato che variano in relazione al bilancio di neve e aria.

3.3.1.2. Modello SAMOS-AT

Il modello SAMOS-AT è stato sviluppato in Austria calibrandolo su 22 valanghe, il suo nome sta per 'Snow Avalanches MOdelling and Simulation – Advanced Technology'. Il modello SAMOS-AT è un'estensione dell'approccio Voellmy che utilizza coefficienti di attrito variabili μ e ξ (Rudolf-Miklau & Sauermoser & Mears, 2015); perciò, si basa su un modello a centro di massa. All'interno del modello viene utilizzato il modello DFL (Dense Flow Layer) per la componente radente con densità di 200-300 kg/m³, mentre viene utilizzato il modello PSL (Powder Snow Layer) per la componente nubiforme con densità di 1-10 kg/m³ (Figura 26).

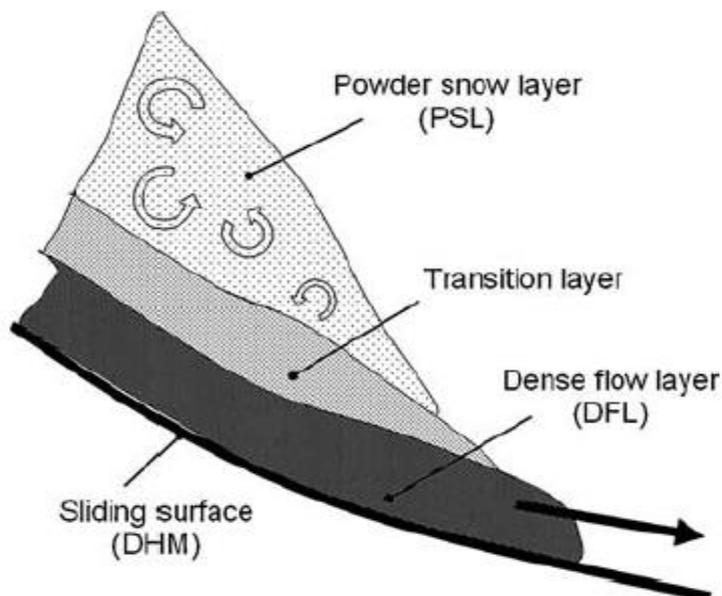


Figura 26: Schema valanga di tipo misto per il modello SAMOS-AT (Sampl & Granig, 2009).

Il modello SAMOS-AT fornisce altezza, velocità e pressione del flusso valanghivo avendogli fornito un DEM, l'area di distacco, l'altezza del distacco e altri parametri come la densità e l'attrito. Questo modello permette di osservare le variazioni di massa considerando la quantità di neve che viene inglobata nel flusso e quella che si sedimenta.

3.3.1.3. *Modello RAMMS*

Il modello RAMMS è un'evoluzione del modello AVAL-1D, è un modello numerico bidimensionale che studia il moto della valanga su un modello del terreno tridimensionale. Il nome RAMMS sta per 'Rapid Mass Movement system'; è stato sviluppato per valanghe di tipo misto e nubiforme e per questo considera le valanghe costituite da due strati: il 'flowing core' avente densità minore al fronte per consentire l'inglobamento di aria e il 'powder cloud' corrispondente alla nuvola in sospensione.

Il core si muove parallelamente al pendio espandendosi lateralmente a causa delle particelle che, avendo movimenti random, creano spazi al fronte che consentono l'inglobamento dell'aria. La segregazione nei due strati avviene perché le particelle più pesanti tenderanno a spostare l'aria per stabilizzarsi e ad andare verso il basso a formare il core, mentre le particelle più leggere andranno verso l'alto con l'aria andando a formare il cloud il quale, una volta formato, tenderà a muoversi indipendentemente rispetto al core. Dal momento che il cloud si crea una volta che la valanga si è già messa in movimento esso avrà come valori iniziali di direzione e velocità pari a quelli del core.

La griglia di calcolo del modello RAMMS è un DTM grazie al quale il modello determina, tramite il metodo numerico dei volumi finiti, il vettore velocità in due dimensioni, la direzione e l'ampiezza del flusso valanghivo.

Il modello si basa sull'assunzione che non vi siano deformazioni interne al corpo valanghivo e che le forze di attrito agiscano principalmente all'interfaccia tra la valanga e la superficie di scorrimento, la forza di attrito avrà una componente Coulombiana e una turbolenta come per il modello di Voellmy-Salm.

Per facilitare l'introduzione di parametri nel modello come l'area di distacco o i coefficienti di attrito è stato collegato il modello RAMMS al sistema GIS GRASS che permette l'inserimento delle coordinate spaziali.

4. Calcolo della pressione di impatto

Le valanghe esercitano pressioni notevoli quando arrivano in corrispondenza di un ostacolo e per questo sono la causa di molteplici danni sia a centri abitati che ad infrastrutture viarie e/o energetiche.

Le valanghe esercitano, quando colpiscono un ostacolo, una pressione dinamica anche se nel calcolo della stessa la si assume, per approssimazione, di tipo stazionario e quindi indipendente dal tempo. Quando all'interno del flusso valanghivo vi è la presenza di blocchi di roccia, ghiaccio o alberi essi causano dei picchi di pressione superiori alla pressione esercitata dal resto del flusso valanghivo durante il loro impatto con un ostacolo.

L'impatto di una valanga su un ostacolo non ha sempre gli stessi effetti perché le pressioni esercitate dipendono dall'interazione tra l'ostacolo e il flusso valanghivo; perciò, dipendono dal tipo di valanga, se radente o nubiforme o mista, e dalla forma e dimensione dell'ostacolo.

Di seguito verranno riportate le formule per la determinazione della pressione esercitata da una valanga su un ostacolo fornite da Sauer Moser, Rudolf-Miklau e Margreth (2015) suddivise in base al tipo di ostacolo colpito, se largo o stretto, e in base alla tipologia di moto della valanga, se radente, nubiforme o mista. Infine, nel Capitolo 4.5 verrà riportata la correlazione tra il regime di flusso della valanga, determinato tramite il numero di Froude, e la pressione d'impatto esercitata dalla valanga stessa. In quest'ultimo capitolo Sovilla, Faug, Kohler, Baroudi, Fischer e Thibert (2016) mostrano, tramite misurazioni effettuate con sensori posizionati su ostacoli colpiti da una valanga, come le formule di Sauer Moser, Rudolf-Miklau e Margreth (2015) siano un'approssimazione delle pressioni realmente esercitate da una valanga valide solo per determinati regimi di flusso della valanga stessa.

4.1. Valanghe radenti su ostacoli larghi

Nel caso di valanga radente su un ostacolo largo una gran parte del flusso verrà bloccato dall'ostacolo su quale eserciterà una pressione dinamica sull'area esposta e solo una piccola parte del flusso girerà attorno allo stesso.

La pressione stazionaria esercitata dalla valanga su ostacoli larghi perpendicolari alla direzione del flusso sarà proporzionale al quadrato alla velocità del flusso valanghivo:

$$p_f = \rho_f \cdot v_f^2 \quad [N/m^2]$$

In cui ' ρ_f ' e ' v_f ' corrispondono rispettivamente alla densità e alla velocità del flusso valanghivo.

Tuttavia, non è sufficiente considerare la pressione stazionaria perché nei primi millisecondi la valanga esercita una pressione di picco (p_{peak}) molto maggiore di cui non è tuttora ben noto su quale parte dell'area esposta al flusso dell'ostacolo agisca.

$$p_{peak} = 3 \cdot p_f \quad [N/m^2]$$

Quando l'ostacolo non è posizionato ortogonalmente alla direzione del flusso valanghivo andrà considerata una componente tangenziale e una normale della pressione esercitata dalla valanga, andrà perciò tenuto conto dell'angolo ' α ' tra la direzione del flusso e la faccia dell'ostacolo esposta al flusso e del coefficiente d'attrito dell'ostacolo:

$$p_n = \rho_f \cdot v_f^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad [N/m^2]$$

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad [N/m^2]$$

Il coefficiente di attrito 'μ' sarà pari a 0.30 nel caso di superficie di scorrimento neve su neve o neve su terreno, mentre avrà valore 0.40 nel caso di scorrimento della valanga su terreni grossolani o su muri con rugosità significativa.

Quando una valanga radente colpisce un ostacolo essa tenderà, per effetto dell'impatto dinamico, in parte a risalire lungo l'area dell'ostacolo esposta al flusso per un'altezza chiamata 'climbing height' ulteriore all'altezza del flusso valanghivo:

$$h_{dyn} = \frac{v_f^2}{2g\lambda} \quad [m]$$

In cui 'λ' è il fattore di perdita di quantità di moto, dovuto all'effetto dell'attrito tra la valanga e l'ostacolo durante la risalita del flusso sullo stesso, esso assume un valore pari a 1.5 nel caso di valanghe di neve asciutta e un valore compreso tra 2 e 3 nel caso di valanghe di neve umida.

4.2. Valanghe radenti su un ostacolo stretto

Nel caso di valanghe che colpiscono ostacoli stretti la maggior parte del flusso valanghivo tenderà a fluire attorno all'ostacolo. Esempi di ostacoli stretti possono essere gli alberi o pali di sostegno dell'alta tensione o del telefono.

La pressione dinamica del flusso valanghivo su un ostacolo stretto, come nel caso dell'ostacolo largo dipende dal quadrato della velocità, viene calcolata come segue:

$$p_f = c_d \cdot \frac{\rho_f \cdot v_f^2}{2} \quad [N/m^2]$$

In cui c_d è il coefficiente di resistenza aerodinamica dell'ostacolo dipendente dalla forma dell'ostacolo stesso e di cui sono riportati i valori in Tabella 5.

Tabella 5: Resistance coefficient c_d (Rudolf-Miklau & Sauermoser & Mears, 2015).

Form	Snow type	
	dry	wet
Circular cylinder	1.5	3 to 5
Rectangle	2	4 to 6
Splitting wedge	1.5	3 to 6

Per passare dalla pressione alla forza esercitata dalla valanga sull'ostacolo si deve moltiplicare la pressione per l'estensione dell'area 'A' dell'ostacolo che viene impattata:

$$P_f = A \cdot c_d \cdot \frac{\rho_f \cdot v_f^2}{2} \quad [N]$$

Anche nel caso di ostacoli stretti le valanghe dense tenderanno in parte a risalire lungo l'ostacolo per la seguente altezza:

$$h_{dyn} = \frac{v_f^2}{2g\lambda} \cdot f_{b/af} \quad [m]$$

In cui 'b' e 'd_f' sono rispettivamente la larghezza dell'ostacolo normale alla direzione del flusso e l'altezza del flusso valanghivo, 'λ' è, come nel caso di valanga radente contro un ostacolo largo, il fattore di perdita di quantità di moto, mentre $f_{b/df}$ è un fattore di riduzione dipendente dai precedenti due parametri e riportato in Tabella 6.

Tabella 6: Reduction factor f (Rudolf-Miklau & Sauer Moser & Mears, 2015).

Table 3.4 Reduction factor f according to [85]

b/d_f	0.1	0.5	1.0	2.0	≥ 3
f	0.1	0.4	0.7	0.9	1

4.3. Valanghe nubiforme

Nella valutazione delle pressioni esercitate dalle valanghe di neve polverosa si tiene conto che gli strati di saltazione e di sospensione hanno densità notevolmente inferiori rispetto alle valanghe radenti, tuttavia, scorrono a velocità superiori. Si assume che lo strato di saltazione abbia valori di densità circa pari a 20-50 kg/m³, mentre lo strato di sospensione ha densità pari a 3-15 kg/m³.

Le valanghe di neve polverosa sono una miscela di particelle di ghiaccio, aria e i grani di neve, la componente solida spesso non segue l'aria nel flusso attorno a un ostacolo colpendo la superficie dello stesso.

La pressione esercitata dalle particelle di ghiaccio e neve viene calcolata con la stessa formula utilizzata per le valanghe di neve densa con l'aggiunta di un coefficiente di pressione dinamico (f_{dyn}) dipendente dalla velocità del flusso e dalla dimensione e concentrazione delle particelle. Il coefficiente di pressione dinamico può assumere valori compresi tra 0.5 e 1, tuttavia, nel caso di incertezze o flusso dell'aria normale all'ostacolo, si assume un coefficiente di pressione pari a 1.

Nel caso di ostacoli stretti il coefficiente di resistenza assumerà i valori riportati nella Tabella 7.

Tabella 7: Resistance coefficient c_d (Rudolf-Miklau & Sauer Moser & Mears, 2015).

Form	Values for c_d	
	Powder layer	Saltation layer
Circular cylinder	1	1
Rectangle	1.5	2
Splitting wedge	1.2	1.5

L'altezza dello strato nubiforme è proporzionale alla lunghezza del percorso valanghivo (l_{path}) e al quadrato della velocità (v) della valanga:

$$h_p = 10^{-4} l_{path} \cdot v^2 \quad [m]$$

Come mostrato nella Tabella 8 l'altezza dello strato nubiforme dipende anche dalla pendenza del pendio; infatti, lo strato tenderà ad avere spessori maggiori per pendenze maggiori.

Tabella 8: Dipendenza dell'altezza dello strato nubiforme dalla pendenza (Rudolf-Miklau & Sauermoser & Mears, 2015).

Slope inclination	dh/dx
10°	0.05
30°	0.10
50°	0.15

La distribuzione in direzione longitudinale e trasversale al flusso delle pressioni in una valanga varia a causa della topografia e della turbolenza; in particolare, gli effetti della turbolenza possono causare picchi di pressione fino a un valore doppio a quello medio.

Se il flusso passa attorno o sopra un ostacolo si dovrà tener conto di quattro effetti:

- Durante il sormonto di un ostacolo la valanga eserciterà una sovrappressione idrostatica dipendente dalla massa e non dalla velocità che potrà assumere valori compresi tra 0.5 e 2 kPa.
- La pressione effettiva dipende dalla forma e dall'orientazione dell'ostacolo rispetto alla direzione del flusso e in generale la pressione si riduce dal centro della faccia esposta al flusso andando verso i bordi.
- Sulle pareti laterali e sulla parte sommitale dell'ostacolo agisce una pressione dinamica negativa dipendente dalla densità della valanga ρ_p e dalla velocità v_p :

$$p_{suc} = -\frac{1}{2}\rho_p v_p^2$$
- Quando la struttura si trova ancora nella zona di scorrimento e quindi lo strato di saltazione è ancora pronunciato si deve tener conto dello sforzo di taglio sull'ostacolo che assume valori pari a circa 0.5-5 kPa.

4.4. Valanga di tipo misto

Molto spesso le valanghe non si verificano come valanghe puramente di tipo radente o puramente polverose, al contrario si manifestano frequentemente come valanghe di tipo misto, ossia costituite da uno strato radente di neve densa, da uno strato di saltazione e da uno strato aeriforme. Per determinare le azioni esercitate dai vari strati costituenti una valanga di tipo misto si assume, per approssimazione, che ogni strato abbia una linea di separazione netta l'uno dall'altro che consenta di valutare separatamente le azioni di ogni strato schematizzate nella Figura 27.

Per ogni strato della valanga di tipo misto viene calcolata l'azione esercitante su un ostacolo come illustrato precedentemente per i tipi di valanga radente e nubiforme.

Pur trascurando l'azione del manto nevoso su un ostacolo, normalmente ritenuta trascurabile rispetto all'azione della valanga, serve tener conto che le forze stesse della valanga possono essere trasferite nel manto nevoso, pressione p_H nella Figura 27, per una profondità pari fino al doppio dell'altezza del flusso radente, questa pressione ha un'andatura lineare che va dal valore p_f in $z = h_f$ a zero in $z = 0$.

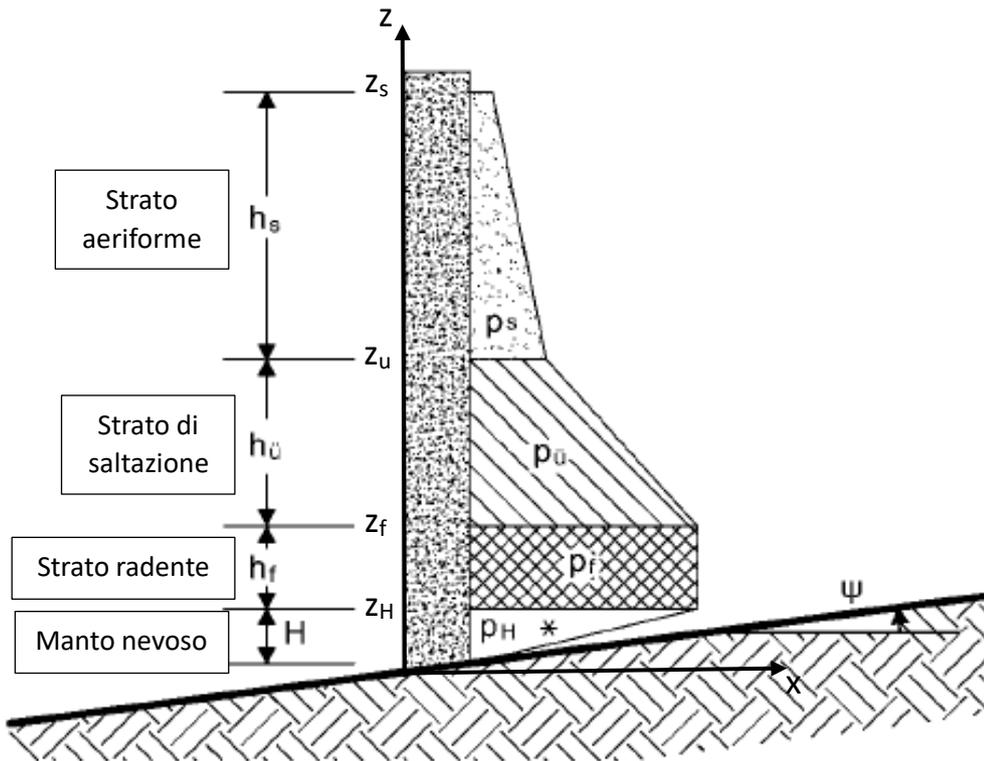


Figura 27: Schema delle pressioni esercitate su un ostacolo dai vari strati costituenti una valanga di tipo misto (Rudolf-Miklau & Sauermoser & Mears, 2015).

Note tutte le pressioni impresse alla struttura dalla valanga è possibile calcolare per un palo la forza totale massima e il momento risultante massimo alla base del palo, quindi con punto di rotazione $z=0$, che la valanga imprime alla struttura come segue:

$$F = \int_0^{z_H} A(z)p_H(z)dz + \int_{z_H}^{z_f} c_d(z)A(z)p_f(z)dz + \int_{z_f}^{z_u} c_d(z)A(z)p_u(z)dz + \int_{z_u}^{z_s} c_d(z)A(z)p_s(z)dz$$

$$M = \int_0^{z_H} zA(z)p_H(z)dz + \int_{z_H}^{z_f} zc_d(z)A(z)p_f(z)dz + \int_{z_f}^{z_u} zc_d(z)A(z)p_u(z)dz + \int_{z_u}^{z_s} zc_d(z)A(z)p_s(z)dz$$

In cui $A(z)$ e $c_d(z)$ sono rispettivamente l'area e il coefficiente di resistenza aerodinamica per ogni tratto di struttura colpito dallo strato di valanga considerato, come illustrato precedentemente il coefficiente di resistenza aerodinamica è dipendente dalla forma dell'ostacolo e dal tipo di flusso che lo colpisce, per questo ogni tratto di ostacolo colpito da un flusso differente avrà coefficiente differente.

Nel caso si dovessero calcolare la forza totale e il momento agenti su un palo nel caso di impatto con valanghe che non sono costituite da tutti gli strati basta con considerare l'integrale dello strato mancante nel calcolo.

4.5. Numero di Froude e pressione d'impatto

Il numero di Froude viene utilizzato per distinguere il regime di flusso che può avere una valanga. Il numero di Froude si definisce come radice quadrata del rapporto fra l'energia cinetica e l'energia potenziale:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad oppure \quad Fr = \frac{u}{\sqrt{gh \cos \psi}}$$

In cui 'u' è la velocità della valanga, 'h' è l'altezza del flusso, 'g' è l'accelerazione di gravità e ' ψ ' è la pendenza media del percorso valanghivo.

Le valanghe di neve asciutta sono caratterizzate da Fr compreso fra 5 e 10, ossia la valanga si comporta come un fluido supercritico (corrente veloce). Le valanghe di neve bagnata sono invece caratterizzate da $Fr \ll 1$, ossia la valanga avrà un flusso subcritico (corrente lenta). Infatti, le valanghe di neve asciutta sono più veloci delle valanghe di neve bagnata.

La pressione esercitata sugli ostacoli calcolata da Sovilla, Faug, Kohler, Baroudi, Fischer e Thibert (2016) considera due contributi: uno da impatto rapido, cioè un termine inerziale proporzionale al quadrato della velocità e uno a lenta spinta dato dal materiale attorno agli ostacoli simile a un contributo idrostatico, cioè un termine gravitazionale proporzionale alla profondità del flusso. Per distinguere quale dei due contributi prevalga in una valanga in studio viene utilizzato il numero di Froude.

Si distinguono tre regimi di flusso: il regime inerziale per $Fr \gg 1$ in cui la pressione esercitata dalla valanga è proporzionale a ρu^2 con ρ la densità del flusso e si ha un flusso supercritico, il regime gravitativo per $Fr \ll 1$ in cui la pressione esercitata dalla valanga è proporzionale a ρgh e si ha un flusso subcritico, il regime transitorio per $Fr \approx 1$ in cui la pressione è proporzionale sia a ρu^2 che a ρgh .

Nelle valanghe eventi regime transitorio le forze inerziali e gravitative hanno lo stesso ordine di grandezza e per questo la pressione esercitata su un ostacolo si calcola come segue:

$$p = \frac{1}{2} C_d \rho u^2 + \zeta \rho g H_{eff}$$

In cui ' H_{eff} ' è l'altezza a cui viene effettuata la misura della pressione rispetto alla superficie della valanga, ' ζ ' è un parametro empirico dipendente dal tipo e dalla dimensione del sensore di rilevamento della pressione utilizzato e ' C_d ' è il 'drag coefficient' che dipende dalla forma e dalla dimensione dell'ostacolo.

Nel calcolo delle pressioni esercitate dalle valanghe viene normalmente considerato il solo contributo del termine inerziale, come si è visto nelle formule di Sauer Moser, Rudolf-Miklau e Margreth (2015) riportate nel resto del Capitolo 4, perché il termine gravitazionale viene considerato trascurabile rispetto al primo. Al contrario Sovilla, Faug, Kohler, Baroudi, Fischer e Thibert (2016) ha evidenziato, come riportato precedentemente, tramite misurazioni effettuate nel sito valanghivo di 'Vallée de la Sionne (VdIS)' l'importanza di entrambi i termini per determinati tipi di valanghe.

5. Effetti delle valanghe polverose sui cavi dall'alta tensione

Le infrastrutture energetiche sono sovente posizionate in territori montani soggetti al pericolo di caduta valanghe; questo perché è necessario portare l'energia a strutture posizionate in quota o perché vengono collegate valli limitrofe facendo passare le linee elettriche dai colli o ancora per collegare dighe in quota al resto della rete energetica nazionale.

Nella scelta del posizionamento delle linee elettriche aeree non è sufficiente posizionare le strutture di sostegno lontano dai percorsi valanghivi perché i cavi in cui passa la corrente elettrica subiscono gli effetti della pressione esercitata dalla componente polverosa delle valanghe, la quale può raggiungere altezze molto elevate e quindi interagire con i cavi. Una volta che i cavi sono stati messi in tensione dalla pressione esercitata dalla valanga essi possono causare il crollo dei tralicci se non strutturati per sostenere le tensioni trasmesse dai cavi.

Quando la componente nubiforme di una valanga impatta sui cavi induce forze di trazione sui cavi in direzione longitudinale agli stessi ed altre forze di trazione in direzione normale al terreno. Le azioni di trazione generate sul cavo inducono sulla struttura di sostegno, palo o traliccio, un momento flettente.

Una ricerca Svizzera (Gorynina & Bartelt, 2023) ha cercato di determinare quale fosse la tensione a cui erano sottoposti i cavi delle linee elettriche aeree nel caso di interazione con una valanga e di seguito si è riportato come può essere calcolata la tensione come indicato da Gorynina & Bartelt, (2023).

L'impatto delle valanghe con le linee elettriche induce vibrazioni trasversali di grande ampiezza nel cavo. Il cavo subisce grandi spostamenti che causano un aumento della tensione con conseguente aumento della deformazione dinamica longitudinale al cavo. Le vibrazioni nei cavi vengono determinate utilizzando equazioni di governo per la propagazione delle onde elastiche modificate per includere effetti non lineari.

La tensione in un punto qualsiasi del cavo può essere data dalla seguente equazione:

$$T(x, t) = T_0(x) + EA \frac{ds}{dx}$$

In cui $T_0(x)$ è tensione iniziale del cavo indicata in Figura 28, 'A' è la sezione del cavo, 'E' è il modulo di Young del cavo e 'ds/dx' è la deformazione dinamica.

Considerando che il materiale costituente i cavi abbia un comportamento perfettamente elastico si può assumere che segua la legge di Hooke.

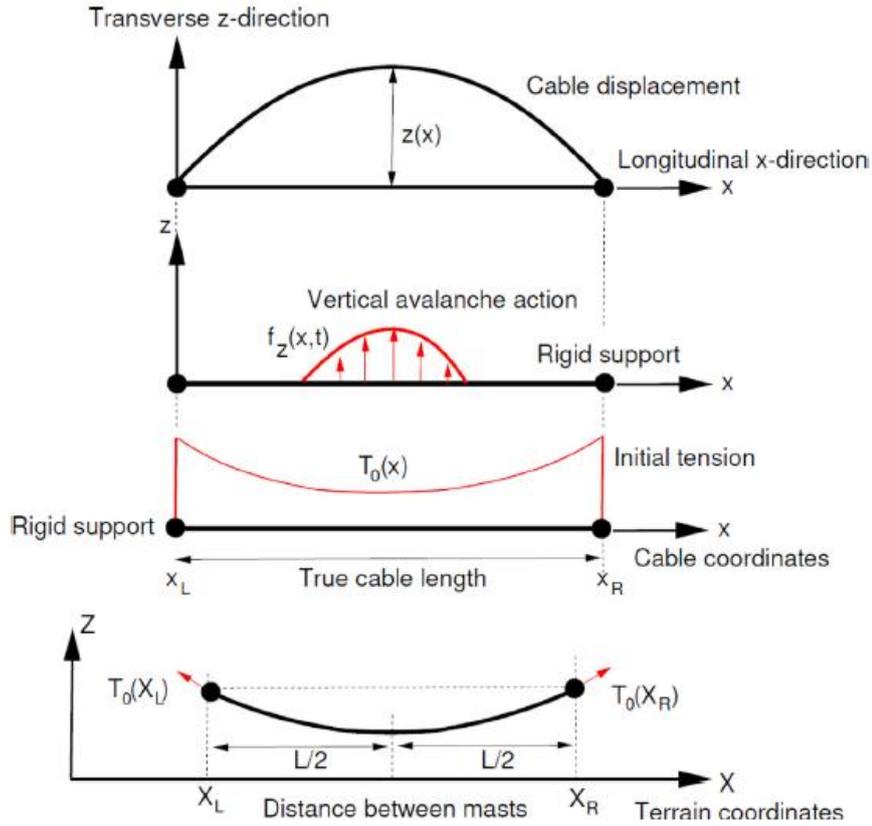


Figura 28: La tensione iniziale viene calcolata rispetto al sistema di riferimento XYZ del terreno, mentre il carico dato dalla valanga e lo spostamento del cavo sono calcolati in riferimento alle coordinate locali xyz del cavo (Gorynina & Bartelt, 2023).

Quest'assunzione permette di considerare nulla la deformazione dinamica iniziale; perciò, considerando il sistema di riferimento locale del cavo xyz indicato in Figura 28, il segmento di cavo 'ds' può essere definito:

$$ds = \sqrt{du^2 + dv^2 + dw^2} - dx \approx \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dx$$

Inserendo l'equazione di 'ds' nell'equazione della differenza di tensione si ottiene:

$$T(x + dx) - T(x) \approx \frac{\partial T}{\partial x} dx = \frac{EA}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$$

L'equazione dello spostamento in direzione longitudinale del cavo compresa sia del termine per la propagazione dello sforzo longitudinale in una barra elastica sia del termine non lineare è:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_l^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{c_l^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \text{con} \quad c_l = \sqrt{\frac{EA}{m}}$$

In cui 'c_l' è la velocità in direzione longitudinale dell'onda, 'u(x,t)' lo spostamento longitudinale e 'm' è la massa per unità di lunghezza del cavo.

Lo spostamento del cavo nella direzione della valanga 'y' e nella direzione verticale 'z' è dato da:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c_t^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + f_y(x, t) \quad \text{con} \quad c_t = \sqrt{\frac{T_0(x)}{m}}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_t^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f_z(x, t)$$

In cui $f_y(x, t)$ e $f_z(x, t)$ sono le funzioni di carico applicate al cavo in direzione 'y' e in direzione 'z' dalla valanga, mentre ' c_t ' è la velocità di propagazione in direzione trasversale dell'onda nel cavo.

Si ottiene così un sistema di 3 equazioni differenziali, costituito dalle equazioni di $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$, $\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$ e $\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$, che descrive la propagazione delle onde nei cavi indotte dall'impatto della valanga.

A questo punto è necessario determinare la tensione iniziale del cavo data dal peso del cavo stesso prima dell'avvento della valanga.

Passando al sistema di riferimento globale XYZ indicato sia in Figura 28 sia in Figura 29, assumendo che la massa per unità di lunghezza del cavo ' m ' sia costante e considerando il caso in cui i piloni di sostegno dei cavi siano posizionati alla stessa quota si avrà che lo spostamento statico verticale (lungo la direzione Z) del cavo seguirà l'equazione della catenaria:

$$Z = a \cosh\left(\frac{X}{a}\right)$$

E in corrispondenza dei supporti del cavo, ossia quando la coordinata orizzontale 'X' è pari a X_R e a X_L , si avrà:

$$Z = a + S = a \cosh\left(\frac{L}{2a}\right)$$

In cui ' L ' è la distanza orizzontale tra i due piloni di supporto dei cavi e ' a ' è il parametro della catenaria per assegnato ' S ', come mostrato in Figura 29.

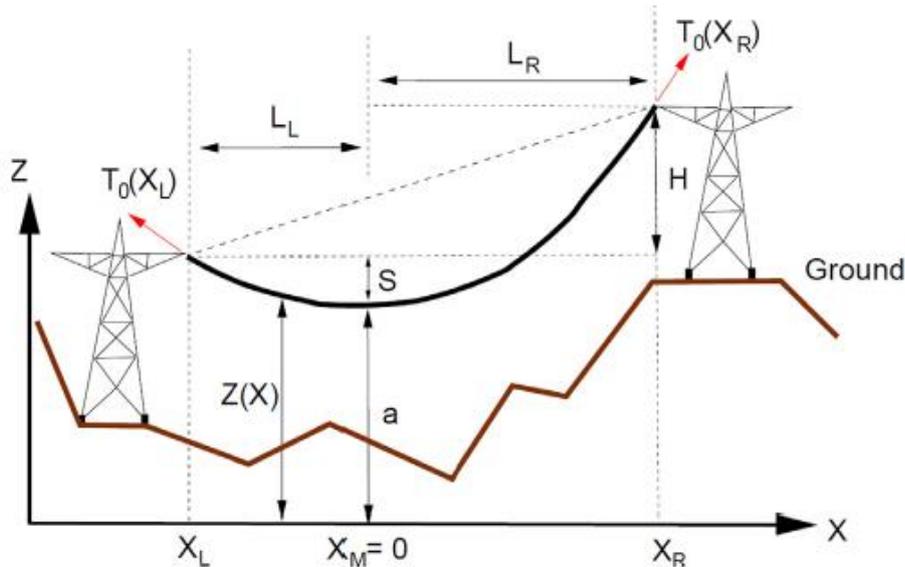


Figura 29: Mostra la posizione del cavo e dei piloni di trasmissione rispetto al sistema di riferimento del terreno XYZ (Gorynina & Bartelt, 2023).

La tensione minima la si ha in corrispondenza della mezzeria, ossia per $X=0$, ed è pari a:

$$T_M = amg$$

Di conseguenza la tensione iniziale in ogni punto del cavo sarà:

$$T_0(x) = T_M \cosh\left(\frac{X}{a}\right)$$

Si può ora passare dalle coordinate del sistema globale XYZ alle coordinate del sistema locale xyz tramite le seguenti formule:

$$x = a \frac{\partial Z}{\partial X} = a \sinh\left(\frac{X}{a}\right)$$

$$T_0(x) = T_M \sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + 1}$$

Nel caso di punti di ancoraggio del cavo posizionati a quote differenti varierà il parametro 'a' della catenaria, ma la formula per la determinazione della tensione iniziale sarà la stessa.

Assumendo di conoscere le pressioni massime di impatto della valanga sul cavo in direzione 'y' e in direzione 'z' si può definire l'ampiezza dell'accelerazione dei cavi con le seguenti equazioni:

$$A_y = \frac{2dp_y^{max}}{mL}, \quad A_z = \frac{2dp_z^{max}}{mL}$$

Si assume che la valanga eserciti un carico di tipo impulsivo triangolare avente andamento lineare: crescente nel tratto da $t=0$ a $t=t_a/2$ con massimo dell'ampiezza in $t=t_a/2$ e decrescente nel tratto successivo fino a diventare nulla per $t = t_a$ dove t_a è la durata della valanga.

La funzione del tempo che descrive la durata dell'azione impulsiva della valanga è la seguente:

$$h(t) = \begin{cases} 2(t/t_a) & \text{per } 0 < t < t_a/2 \\ 2(t_a - t)/t_a & \text{per } t_a/2 < t < t_a \end{cases}$$

La funzione che descrive la distribuzione spaziale delle forze applicate all'intera lunghezza del cavo è:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{2(x - x_L)}{x_R - x_L} & \text{per } x_L < x \leq 0 \\ \frac{x_R - x_L - 2x}{x_R - x_L} & \text{per } 0 < x \leq x_R \end{cases}$$

Si possono quindi ottenere le funzioni del carico applicato al cavo nelle direzioni 'y' e 'z' che vanno inserite nel sistema di tre equazioni differenziali descritto precedentemente:

$$f_y(x, t) = A_y \cdot h(t) \cdot g(x); \quad f_z(x, t) = A_z \cdot h(t) \cdot g(x)$$

6. Strutture di sostegno delle linee elettriche aeree

Dopo aver indagato nei capitoli precedenti come si formano le valanghe e come determinare le pressioni che esercitano quanto colpiscono un ostacolo, nel presente capitolo si analizzeranno i sostegni delle linee elettriche aeree utilizzate sul territorio.

I sostegni delle linee elettriche aeree si dividono in due grosse categorie che sono i pali, utilizzati nelle linee elettriche a bassa e a media tensione e discussi nel Capitolo 6.1, e i tralicci, utilizzati nelle linee elettriche ad alta e ad altissima tensione e solo raramente per linee a tensione inferiore, i quali saranno discussi nel Capitolo 6.2.

Dopo aver riportato inizialmente quali siano le tipologie di sostegni delle linee elettriche aeree e come vengono ancorati al terreno nel Capitolo 6.3, si andrà a illustrare nel Capitolo 6.4 quali siano gli effetti delle valanghe di neve sui sostegni quando li colpiscono.

6.1. Strutture di sostegno a palo

I sostegni a palo hanno forma circolare (Figura 30) e possono essere di tipo: tubolare in calcestruzzo armato centrifugato (c.a.c.) per altezze fino a 14 m, pali misti in c.a.c. con prolunga in lamiera zincata, tubolari poligonali in lamiera zincata a tronchi innestati per altezze fino a 16-27 m o tubolari a sezione ottagonale in lamiera zincata fino a 12 m di altezza, nel caso di infrastrutture datate si possono ancora trovare pali di sostegno in legno i quali non vengono però utilizzati nelle nuove installazioni.

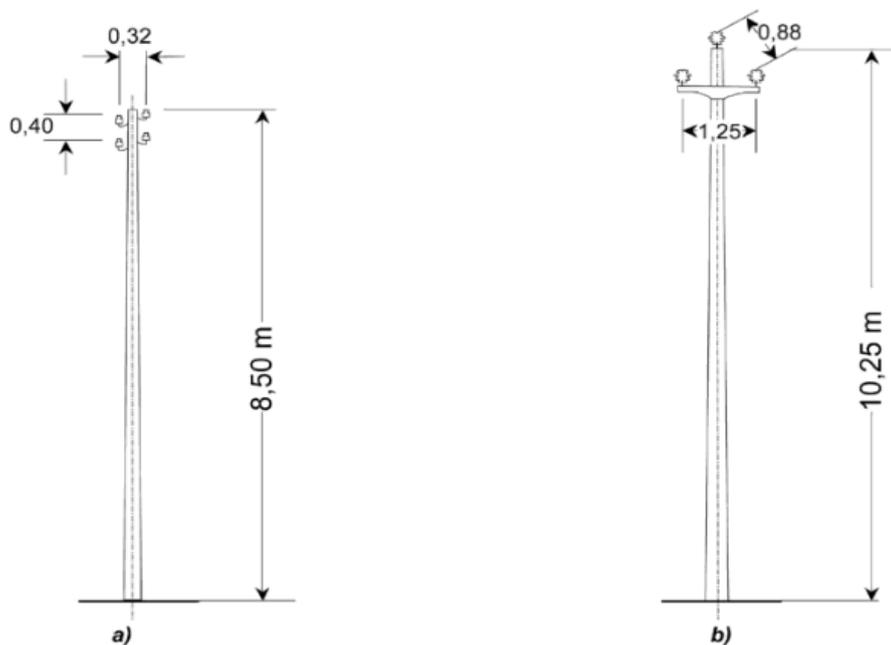


Figura 30: Il palo a) è un esempio di sostegno per linee a BT, mentre il palo b) è un esempio di sostegno per linea a MT (Benato & Fellin, 2011).

Alla sommità dei pali vengono posizionate strutture di sostegno, nelle varie tipologie riportate in Figura 31, tra gli isolatori dei cavi elettrici e il palo, che consentono di rispettare le distanze richieste dalla normativa vigente fra i cavi.

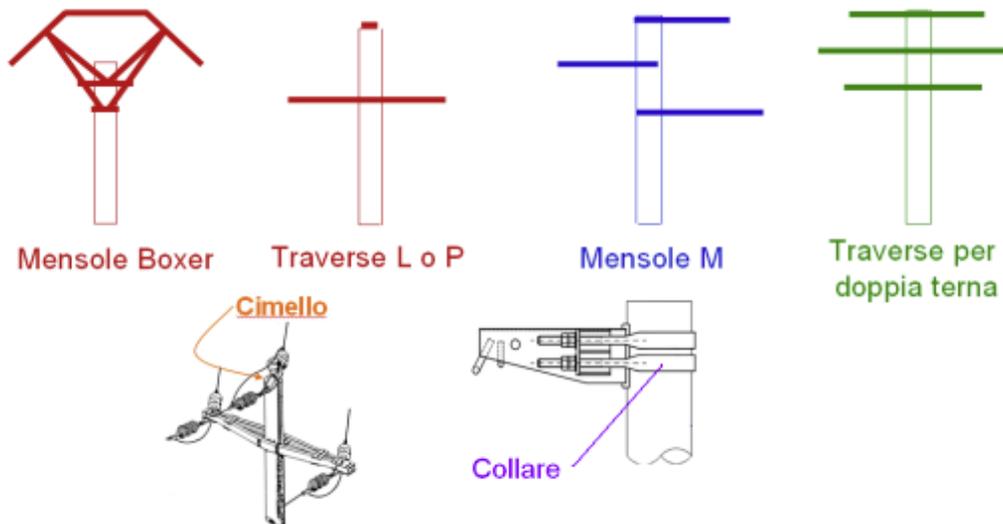


Figura 31: Strutture di sostegno di collegamento fra gli isolanti e i pali (Balduzzo, 2011).

6.1.1. Dimensioni tipiche delle strutture di sostegno a palo

Qualunque sia il materiale costituente il palo di sostegno essi hanno diametro maggiore alla base che si riduce man mano che si va verso l'alto, la variazione del diametro lungo la verticale è possibile perché andando verso l'alto si riducono l'intensità delle azioni a cui deve resistere il palo; inoltre, questa forma permette di ridurre al minimo il materiale utilizzato e quindi i costi di ogni singolo elemento.

I pali in lamiera zincata di acciaio a sezione ottagonale, per linee aeree a media e bassa tensione, hanno diametri alla base che variano da 22 a 62 cm e in punta da 10 a 24 cm circa, mentre lo spessore della lamiera varia da 3 a 6 mm al crescere del diametro del palo. La dimensione del palo non è tanto funzione dell'altezza, la quale varia a seconda delle esigenze tra 9 e 12 m, ma dalle azioni a cui i pali vengono sottoposti e quindi alla massima resistenza che devono essere in grado di sviluppare. Avendo lunghezza limitata questo tipo di palo viene realizzato in un unico tronco mediante formatura a freddo della lamiera.

I pali in lamiera in acciaio innestati a sezione poligonale, per linee elettriche aeree BT e MT, partono dall'altezza massima raggiungibile con i pali a sezione ottagonale e possono giungere fino a 27 m di altezza, per questo raggiungono diametri e spessori della lamiera maggiori: di diametro varia alla base tra 25 e 103 cm, alla sommità tra 10 e 28 cm circa, mentre lo spessore della lamiera varia tra 3 e 8 mm. Avendo lunghezze importanti questa tipologia di palo viene portato in cantiere in 2 o 3 tronche i quali vengono sovrapposti e saldati sul posto.

I pali in c.a.c. hanno altezze comprese tra 9 e 14 m il diametro alla base varia tra 24 e 52 cm, mentre alla sommità varia tra 10 e 32 cm circa.

Nel caso di pali di tipo misto si ha il tronco sottostante il c.a.c. che può avere altezza compresa tra 8 e 12 m e ha diametro alla base compreso tra 32 e 59 cm, mentre alla sommità varia tra 18 e 41 cm circa. Il tronco in lamiera saldata che viene ancorato al disopra di quello in c.a.c. ha lunghezza compresa tra 2.5 e 7 m, il suo diametro all'ancoraggio è compreso tra 15 e 33 cm e alla sommità tra 19 e 44 cm circa.

6.2. Strutture di sostegno a traliccio

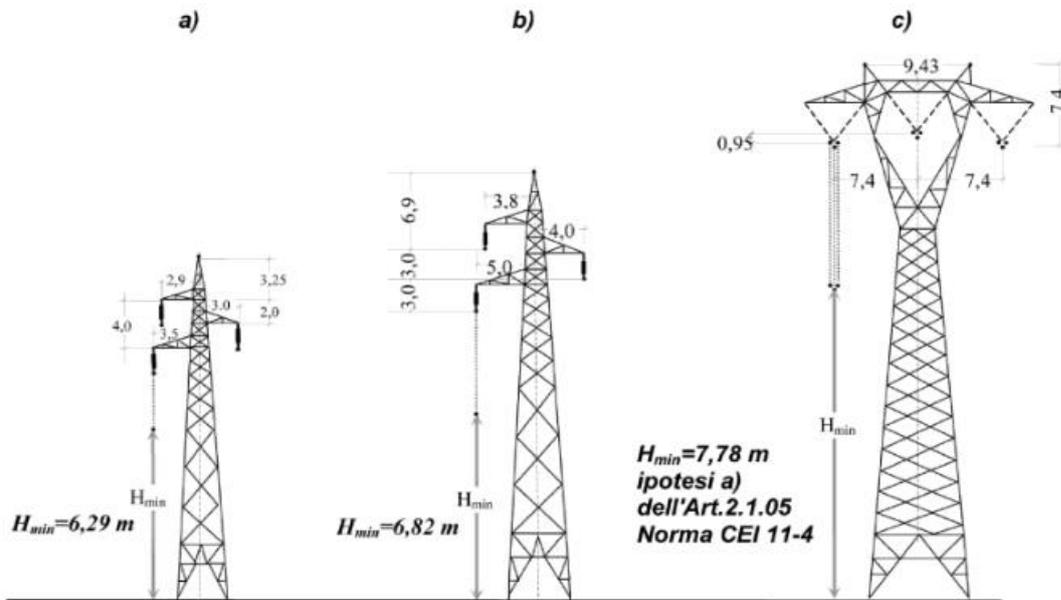


Figura 32: i tralicci a) e b) sono di tipo tronco-piramidale il primo per linea a 132-150 kV e il secondo per linea a 220 kV, mentre il traliccio c) è di tipo tronco a Y ed è utilizzato per linee a 380 kV (Benato & Fellin, 2011).

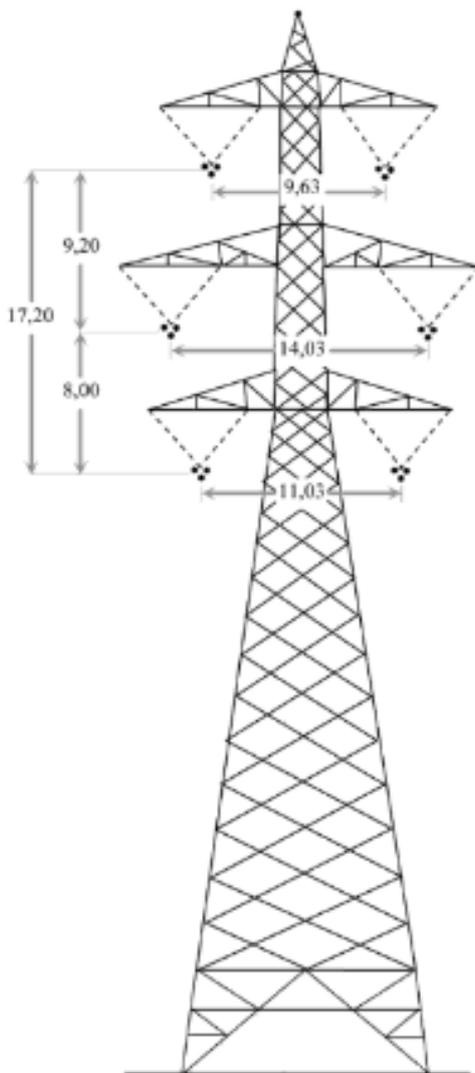


Figura 33: sostegno a traliccio tronco-piramidale per una linea area con tensione 380 kV (Benato & Fellin, 2011).

I sostegni a traliccio sono strutture reticolari in acciaio zincato i cui profilati possono essere o a L o a lati uguali. Nella in Figura 33 e in Figura 33 sono riportati alcuni esempi di tralicci utilizzati per le linee AT e AAT, per esse è riportata un'altezza minima dal suolo dei cavi in tensione, imposta dalla norma UNI CE 11-4, che dipende dalla tensione concatenata dei cavi U_{kV} :

$$H_{min} = 5.5 + 0.006 \cdot U_{kV} \quad [m]$$

Nel caso dei sostegni a traliccio, oltre a sostenere i cavi della linea elettrica, sono collegati da funi di guardia che hanno lo scopo di proteggere i cavi di fase dalle fulminazioni dirette che potrebbero danneggiarli.

6.3. Fondazioni delle strutture di sostegno

Le fondazioni dei sostegni delle linee elettriche aeree sono generalmente plinti in cemento armato atti a trasmettere al terreno i carichi strutturali dal sostegno: nel caso dei sostegni tubolari si ha un unico plinto di fondazione, il quale può essere o di tipo monolitico o con riseghe, nel caso dei tralicci si costruisce un plinto per ogni piede del traliccio.

Le fondazioni standard per i tralicci, utilizzate su terreni normali con consistenza da buona a media come nella Figura 34, prevedono che per ogni piede del traliccio vi sia una serie di platee sovrapposte di forma parallelepipedica a pianta quadrata appoggiate sul fondo dello scavo, al di sopra vi è un colonnino in calcestruzzo, la cui inclinazione dipenderà della direzione che dovrà avere il montante del sostegno, in cui viene annegato un moncone al momento del getto a cui si collegherà il montante del piede del traliccio (Zonta, 2012). Nel caso di terreni instabili, allagabili o aventi caratteristiche geomeccaniche scadenti è richiesta una progettazione ad hoc della fondazione.

I tralicci di piccole dimensioni utilizzati per linee elettriche aeree di MT o BT potrebbero avere come fondazione un plinto monolitico come per le strutture di sostegno a palo.



Figura 34: Esempio di fondazioni per una linea elettrica aerea AAT (Benato & Fellin, 2011).

6.4. Effetti delle valanghe di neve sulle strutture di sostegno

Si andrà ora a riportare come le valanghe di neve interagiscano con le strutture di sostegno delle linee elettriche aeree. Si riporteranno inizialmente osservazioni valide per qualunque tipologia di sostegno, successivamente si riporteranno nei sotto capitoli dal 6.4.1 al 6.4.3 gli effetti delle valanghe di neve specifici prima per le strutture a palo, poi per le strutture a traliccio e infine per le fondazioni dei sostegni nel caso fuoriescano dal terreno.

Nel caso di valanga radente essa interagisce con le strutture di sostegno come un flusso denso che andrà ad impattare sulla frazione più prossima al terreno della struttura. La componente radente di una valanga scorre al di sopra del manto nevoso ed andrà ad esercitare una pressione sulle strutture avente distribuzione rettangolare per l'intera altezza del flusso e distribuzione triangolare per l'altezza di risalita del flusso sulla

struttura stessa. Normalmente non viene considerata l'azione della pressione esercitata dal manto nevoso perché trascurabile rispetto all'azione della valanga (Margreth, Stoffel & Schaer, 2016); tuttavia, nel caso in cui la struttura di sostegno si trovasse su superficie inclinata con spessori del manto nevoso previsti importanti la pressione esercitata dal manto potrebbe fare la differenza tra la resistenza o meno della struttura all'azione della valanga

Nel caso si ritenesse opportuno considerare l'effetto del manto nevoso si assume che esso eserciti una pressione avente distribuzione rettangolare lungo l'intero spessore del manto.

Nel caso le strutture di sostegno venissero colpite da una valanga nubiforme si può assumere che lo strato di saltazione eserciti una pressione sulla struttura avente distribuzione approssimativamente rettangolare, mentre lo strato aeriforme, sovrastante lo strato di saltazione, eserciterà una pressione che diminuisce con l'altezza e quindi la pressione esercitata sulla struttura avrà una distribuzione triangolare. L'azione esercitata dallo strato aeriforme è una pressione di tipo dinamico simile a quella esercitata dal vento, la quale può assumere direzioni anche molto diverse dalla direzione principale della valanga a causa delle strutture turbolente che la costituiscono.

Lo strato nubiforme di una valanga esercita sulla parte sommitale delle strutture di sostegno un'azione orizzontale forte e impulsiva descrivibile come un carico dinamico simile a quella che compie una raffica di vento (Caviezel, Margreth, Ivanova, Sovilla & Bartelt, 2021). Le sottostrutture che devono tenere i cavi sollevati molti metri da terra sono pesanti e quindi rendono pesante la parte sommitale delle strutture di sostegno; ciò comporta, essendo pali e tralicci dimensionati per sostenere le azioni verticali e le azioni orizzontali del solo vento prevedibile nell'area in cui vengono collocati, che più la parte sommitale della struttura sarà pesante più la struttura di sostegno stessa sarà vulnerabile alle azioni orizzontali del soffio della valanga che spingeranno i carichi al di fuori dell'asse verticale.

Se la valanga che colpisce una struttura di sostegno ha inglobato al suo interno sassi, tronchi, ghiaccio o agglomerati di neve li si dovranno studiare come carichi puntuali normalmente esercitanti una pressione superiore di quella media esercitata dal flusso valanghivo (Rudolf-Miklau, Sauermoser & Mears, 2015).

6.4.1. Effetti delle valanghe di neve sulle strutture di sostegno a palo

Le strutture di sostegno a palo, nel caso venissero impattate da una valanga radente, sono strutture sufficientemente strette da non modificare in modo significativo velocità e direzione del flusso valanghivo; perciò, nella valutazione degli effetti dell'impatto di una valanga possono essere considerate strutture strette a sezione circolare per le quali non è necessario tener conto dell'orientazione della struttura rispetto alla direzione della valanga. Le pressioni esercitate da una valanga radente su questo tipo di struttura sono illustrate nel Capitolo 4.2.

Nel caso di impatto di una valanga nubiforme essa causa delle accelerazioni sui pali, le quali sono massime alla sommità in direzione trasversale e in intensità minore in direzione longitudinale al palo. Essendo la componente polverosa di una valanga costituita da aria mista a cristalli di neve e ghiaccio aventi moto turbolento la sua azione sulla struttura di sostegno non sarà assimilabile a un unico carico di durata 't'; ma, come hanno riportato Caviezel, Margreth, Ivanova, Sovilla e Bartelt (2021) dopo aver effettuato delle misurazioni su un pilone alto 20 m, la struttura subisce un'azione equivalente a una serie di colpi ad alta frequenza, i quali loro hanno misurato essere di durata compresa tra 0.25 e 0.5 secondi, questi impulsi corrispondono alle strutture turbolente della nube polverosa a cui il pilone da loro studiato è in grado di reagire in base alla propria frequenza di oscillazione. Perciò, ogni struttura di sostegno che viene impattata da una valanga polverosa viene sottoposta a una serie di carichi dinamici impulsivi, la loro durata dipenderà

dalle caratteristiche intrinseche della struttura, ossia dalle frequenze a cui il palo oscilla, e dalle strutture turbolenti costituenti il flusso nubiforme della valanga.

6.4.2. Effetti delle valanghe di neve sulle strutture di sostegno a traliccio

Nel caso in cui una valanga radente impattasse una struttura di sostegno a traliccio si potrebbe pensare che i tralicci permettano al flusso valanghivo di scorrere attraverso gli spazi interni alla struttura stessa senza interferire con il flusso, questo però avviene solo in parte se lo spazio fra i profilati del traliccio è superiore a 1 m; diversamente i tralicci si comportano come ostacoli pieni e la componente della valanga che riesce a passare attraverso il traliccio risulta trascurabile, cosa che normalmente accade per i tralicci aventi larghezza inferiore a 2 m o per i montanti triangolari dei tralicci di dimensione maggiore.

I tralicci fino a 2 m di larghezza possono essere assimilati ad ostacoli stretti di cui sarà necessario tener conto dell'orientazione rispetto alla direzione della valanga per la determinazione dell'estensione dell'area impattata dalla valanga. Nel caso di tralicci di dimensioni maggiori sarà necessario considerare l'influenza della vicinanza dei quattro montanti triangolari del traliccio e di conseguenza la loro influenza sul flusso valanghivo.

6.4.3. Effetti delle valanghe di neve sui plinti di fondazione

In caso di impatto di una valanga radente su una struttura di sostegno, se le fondazioni dovessero fuoriuscire dal terreno per un'altezza superiore allo spessore del manto nevoso sarà necessario tener conto dell'influenza di questi elementi durante la valutazione dell'impatto di una valanga su strutture di sostegno.

La scelta di innalzare l'altezza del plinto di fondazione in calcestruzzo permette di proteggere la struttura di sostegno da rami e sassi inglobati nel flusso radente di una valanga, lo strato di saltazione e di sospensione in una valanga nubiforme o mista agisce normalmente invece a una quota superiore, quindi al di sopra delle strutture in calcestruzzo.

I plinti di fondazione dei pali possono essere considerati ostacoli stretti in quanto non hanno mediamente dimensioni particolarmente elevate, al contrario i plinti di fondazione dei tralicci si potrebbe doverli considerare ostacoli grandi se superano i 2 m di larghezza. È necessario tener conto dell'orientazione degli ostacoli rispetto alla direzione del flusso valanghivo in quanto ne dipende l'estensione dell'area esposta al flusso (Figura 36) e l'intensità della pressione esercitata dalla valanga (Figura 35).

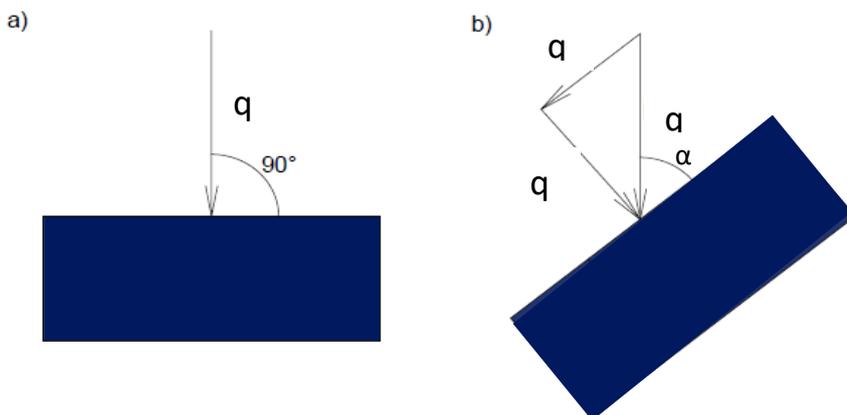


Figura 35: La figura a) mostra un ostacolo con la faccia esposta al flusso valanghivo perpendicolare alla direzione della valanga, la figura b) mostra lo stesso ostacolo orientato di un angolo α rispetto alla direzione della valanga.

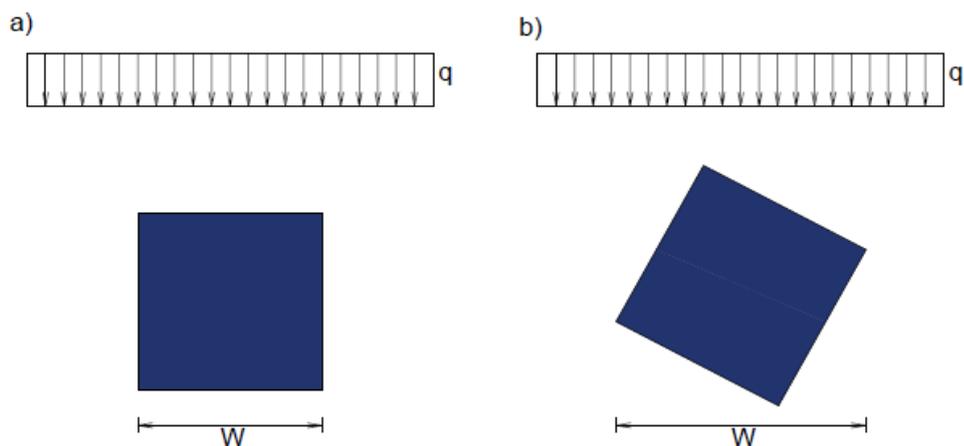


Figura 36: Passando dall'immagine a) all'immagine b) si vede come cambia la larghezza 'W' della parte di un ostacolo esposta al flusso della valanga.

Nel caso di ostacoli stretti è necessario tener conto dell'orientazione della struttura principalmente per inserire nel calcolo della pressione esercitata dalla valanga, riportata nel Capitolo 4.2, la reale larghezza dell'area esposta al flusso; dato che il flusso valanghivo non viene influenzato in modo significativo dall'ostacolo a cui girerà attorno, l'effetto dell'angolo che si forma tra la pressione applicata dalla valanga e l'orientazione della faccia su cui la valanga agisce sarà trascurabile.

Invece, nel caso di ostacoli grandi, è necessario tener conto dell'orientazione dell'ostacolo perché esso potrà o fermare il flusso o deviarlo a seconda della sua orientazione rispetto alla direzione della valanga. Nel caso l'ostacolo non fosse posizionato perpendicolarmente al flusso si dovrà tener conto della presenza di una componente normale e di una componente tangenziale della pressione esercitata dalla valanga, di cui la formula è riportata nel Capitolo 4.1, che agiscono sulle facce dell'ostacolo con cui la valanga interagisce.

7. Eventi valanghivi che hanno danneggiato infrastrutture energetiche in Valle d'Aosta

Dopo aver descritto nei capitoli precedenti sia le caratteristiche delle valanghe di neve sia le caratteristiche delle strutture di sostegno delle linee elettriche aeree, si andrà ad osservare quali siano i danni che generalmente le valanghe causano alle infrastrutture energetiche in ambito montano. In particolare, si sono ricercati i danni subiti dalle infrastrutture energetiche in Valle d'Aosta tramite la consultazione del catasto valanghe valdostano.

Si sono quindi riportate di seguito le valanghe che hanno causato danni alle infrastrutture energetiche e di cui esista una documentazione fotografica indicando ogni evento valanghivo con gli stessi codici utilizzati nel 'Catasto regionale valanghe SCT' da cui sono state prese le informazioni.

7.1. V-01-088:

La valanga V-01-088 (Figura 37) è avvenuta nel comune di Gressoney-Saint-Jean in località Schméto sul versante orografico sinistro della valle. Per questo evento è stata stimata una frequenza di accadimento di almeno una volta ogni 30 anni.

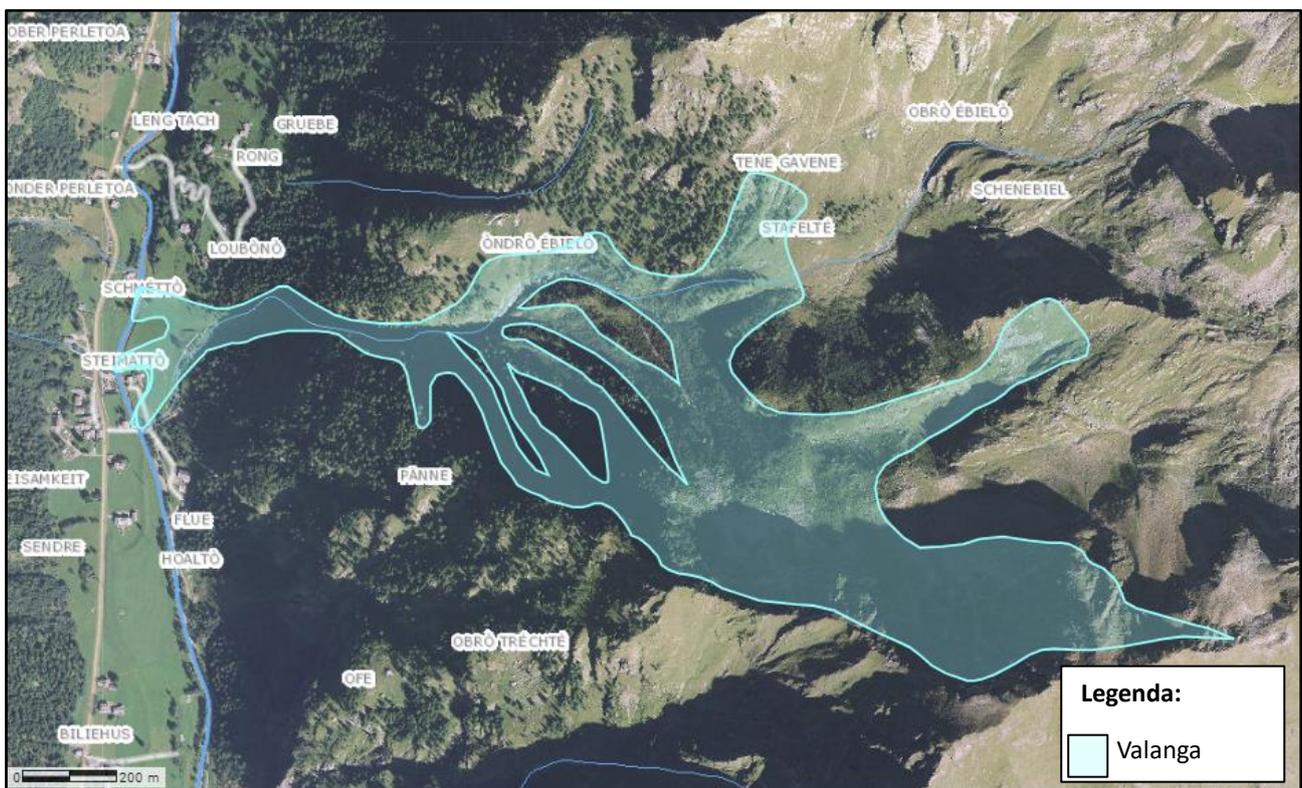


Figura 37: Rappresentazione cartografica della valanga V-01-088 (Catasto regionale valanghe SCT).

La valanga è scesa in modo spontaneo, in almeno due momenti diversi, il 28/04/1986 causando il ribaltamento di un traliccio nella zona di accumulo.

La valanga, di cui si possono vedere le zone di scorrimento e accumulo nella Figura 40, era di tipo incanalato e il suo accumulo è stato trovato a partire da quota 1400 m s.l.m., alla base del canalone, fino al torrente Lys. L'accumulo era costituito da neve pallottolare mista a terra, rami e sassi che la valanga ha inglobato durante la sua discesa.

7.1.1. Danni:



Figura 38: Ribaltamento di un traliccio nella zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).

La valanga ha causato l'abbattimento di un traliccio di tipo tronco-piramidale in acciaio nella zona di accumulo. Dall'unica immagine disponibile (Figura 38) del traliccio abbattuto si comprende che i cavi hanno trattenuto la parte sommitale del traliccio all'incirca nella stessa posizione originale, mentre la base del traliccio è stata spinta dal flusso valanghivo radente verso valle. Venendo spinta la base del traliccio verso valle, mentre la parte sommitale è rimasta trattenuta dai cavi, il traliccio si è piegato verso monte assumendo la forma e la posizione visibili nella foto sovrastante.

Nella Figura 39 si può vedere che oltre all'abbattimento del traliccio è stata danneggiata anche una baita. Dopo il primo evento la baita era rimasta integra, ma in seguito al secondo evento è stata completamente distrutta.



Figura 39: Foto della zona di accumulo dell'evento valanghivo. Nelle prime due foto in alto si evidenzia in rosso come in un primo momento la baita non fosse stata interessata dalla valanga, mentre in un secondo momento è stata completamente travolta (Catasto regionale valanghe SCT).

7.1.2. Foto evento valanghivo:

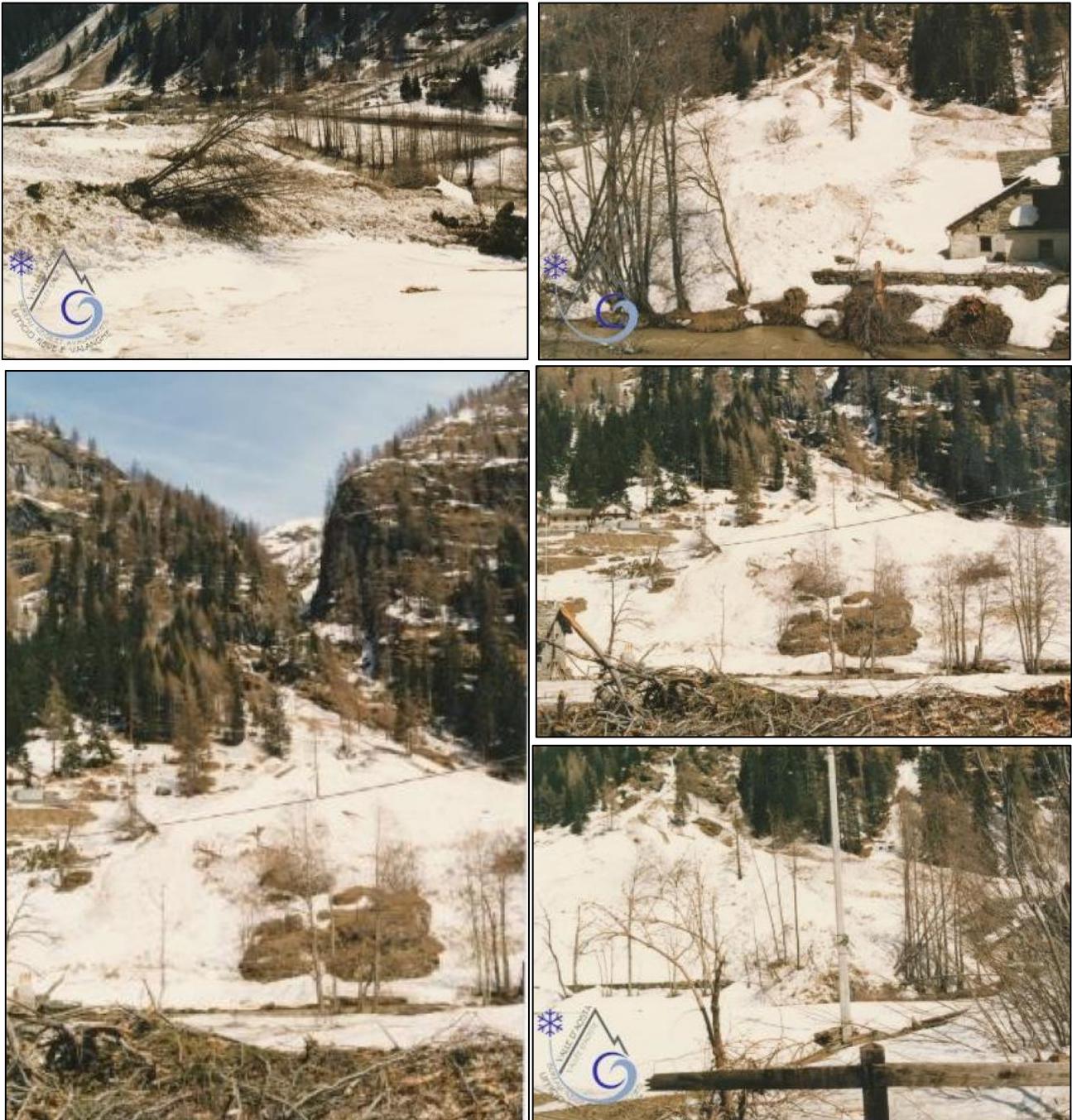


Figura 40: Foto della zona di scorrimento e della zona di accumulo dell'evento valanghivo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.2. V-01-109

La valanga V-01-109 (Figura 41) è avvenuta nel comune di Gressoney-La-Trinité in località Léschebalmò sul versante orografico sinistro della valle. Si è ipotizzato che questa valanga abbia una frequenza di accadimento pari ad almeno una volta ogni 5 anni.



Figura 41: Rappresentazione cartografica della valanga V-01-109 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento valanghivo è avvenuto in modo spontaneo il 21/03/1971 percorrendo un dislivello complessivo di 1115 m; la valanga di tipo incanalato, una volta giunta nella zona di accumulo ad est della frazione di Léschelbamò, ha causato il ribaltamento di un traliccio. La valanga ha stranamente interessato l'abitato di Léschelbamò (Lysbalma) che normalmente rimane protetto dalla presenza di un terrapieno che devia le valanghe sui pascoli vicini. Le zone di scorrimento e accumulo sono visibili in Figura 43.

La zona di distacco si trova in località Spelmanschbéerg in un canalone in prossimità di creste, la quota massima della nicchia di distacco si trova a 2725 m s.l.m. La zona di accumulo si trova alla base del canalone ed ha raggiunto la quota minima di 1610 m s.l.m. andando ad interessare la strada comunale. Il deposito della valanga era costituito oltre che di neve anche di rami e terra.

7.2.1. Danni:



Figura 42: Traliccio ribaltato nella zona di accumulo ad est della frazione di Léschelbamò (Catasto regionale valanghe SCT).

Nella Figura 42 si può vedere un traliccio di sostegno di tipo tronco-piramidale in acciaio della linea elettrica abbattuto dalla valanga nella zona di accumulo. Dall'immagine si può vedere che la pressione della valanga sul traliccio piramidale ha causato una rotazione rigida alla base del traliccio. Il traliccio danneggiato si trattava probabilmente di un traliccio per linea elettrica aerea a MT perché, confrontandolo che i larici sul retro della foto, sembra avere dimensioni contenute.

Oltre il traliccio hanno subito danni anche il bosco e alcuni fabbricati di cui però non si hanno foto. La valanga ha seppellito due case situate ad est dell'abitato di Léschelbamò (Lysbalma) causando tuttavia solo danni di lieve entità alle strutture.

Il fatto che gli edifici seppelliti dal flusso della valanga abbiano subito solo danni lievi fa supporre che la valanga sia giunta con bassa energia nella zona di accumulo e che il traliccio avesse una fondazione debole che ha permesso il ribaltamento dello stesso anche con livelli bassi di pressione esercitata dalla valanga.

7.2.2. Foto evento valanghivo:

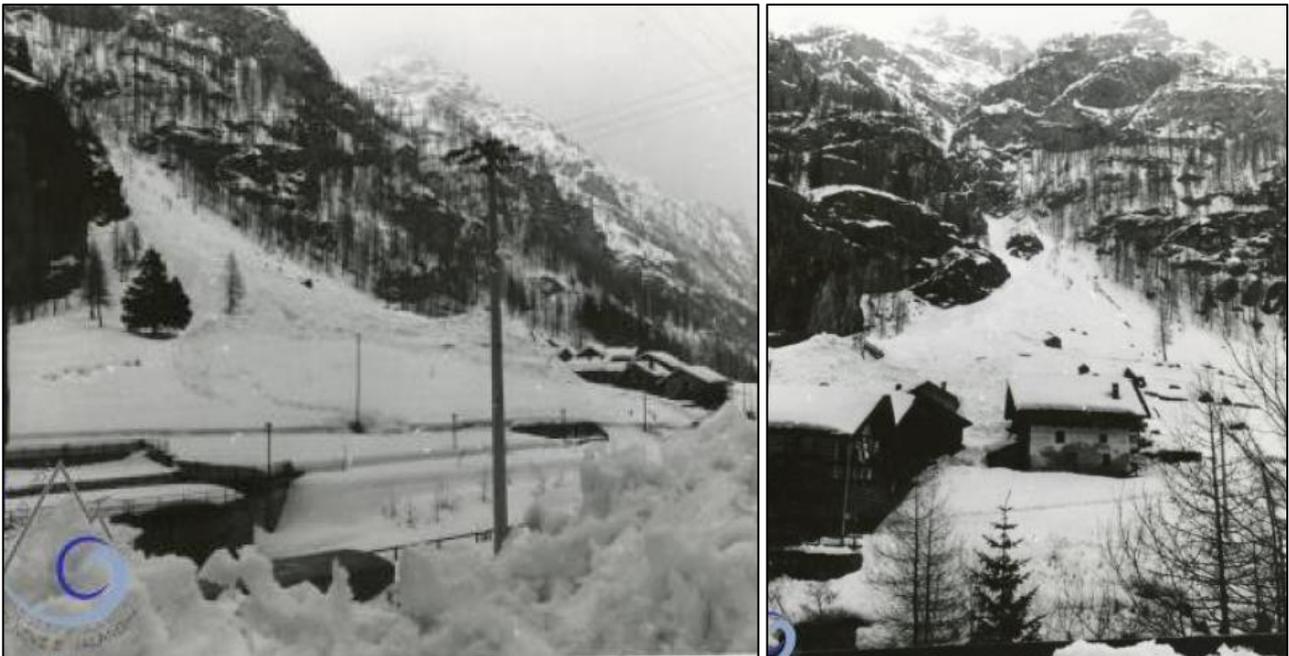


Figura 43: Foto della zona di scorrimento e della zona di accumulo dell'evento valanghivo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.3. V-05-036

La valanga V-05-036 (Figura 44) è avvenuta nel comune di Valtournenche in località Breuil-Chateau-Glacier du Mont Tabel all'interno del comprensorio sciistico sul versante orografico destro della valle.

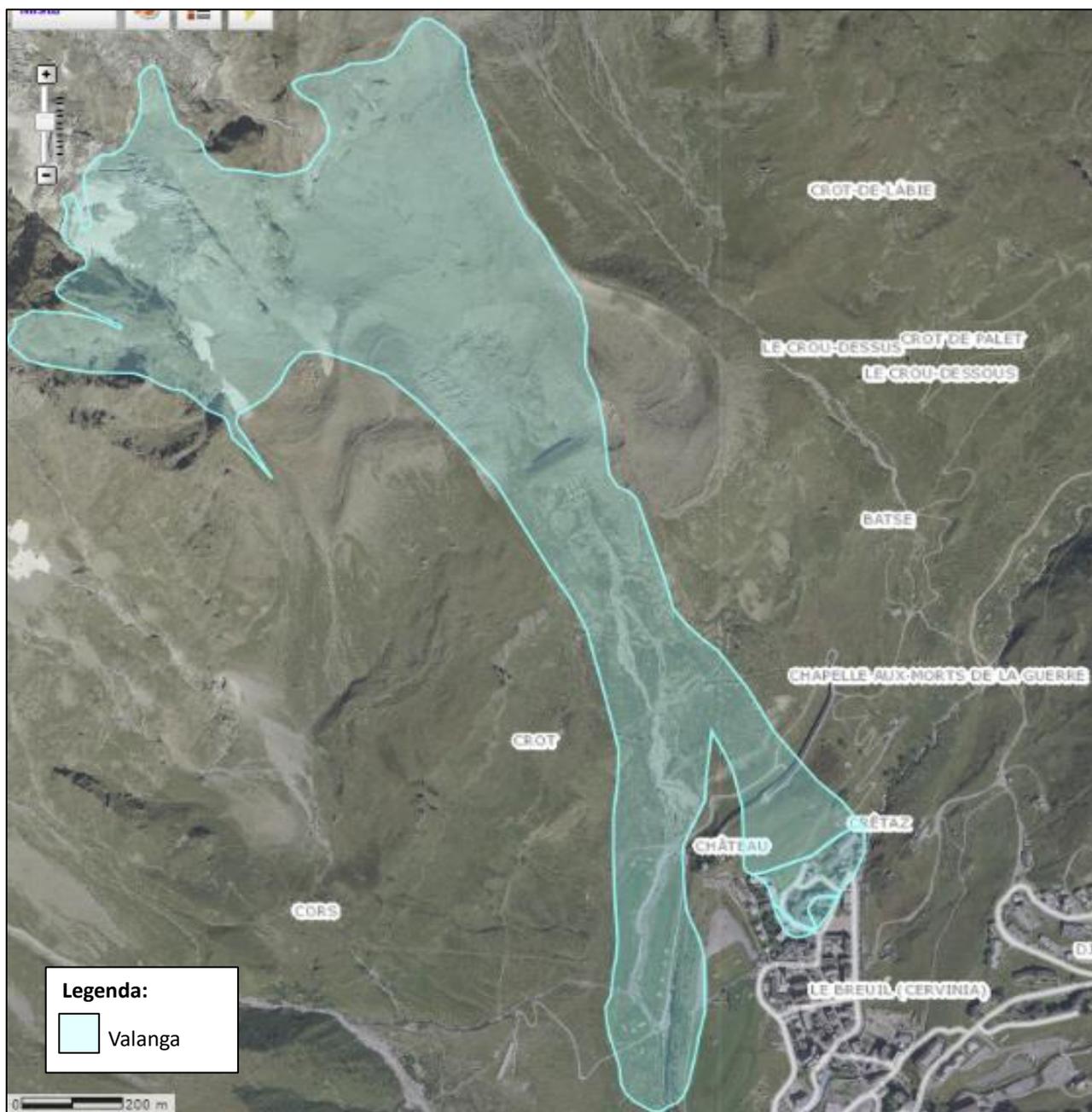


Figura 44: Rappresentazione cartografica della valanga V-05-036 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento valanghivo è avvenuto il 04/02/1980 nella notte tra le ore 18 e le 6 del mattino successivamente a forti nevicate nei 2-3 giorni precedenti che hanno portato al deposito di 51 – 100 cm di neve fresca seguiti da un forte rialzo delle temperature con precipitazioni anche piovose a quote elevate il giorno stesso dell'evento.

La nicchia di distacco della valanga, visibile in Figura 49, si trova su un pendio aperto sulle pendici rocciose delle Grandes Murailles nel bacino del ghiacciaio del Mont Tabel. Il limite del distacco della valanga, di tipo lineare, è avvenuto a una quota comprese tra 3200 e 3600 m s.l.m. A causare il distacco della valanga è stato principalmente il carico dovuto alla neve ventata e in secondo luogo al carico dato dalla neve fresca.

La valanga che è avvenuta era di superficie costituita da neve da umida a bagnata iniziata come una valanga a lastroni ad alta coesione ed ha continuato la sua discesa con moto di tipo radente. La valanga è scesa lungo un versante aperto all'interno del bacino glaciale nella prima parte del suo percorso per poi incanalarsi tra le morene laterali dividendosi a una quota di 2200 m s.l.m. in due rami. La zona di scorrimento è visibile in Figura 50.

Delle due ramificazioni della valanga una ha raggiunto il piano del Breuil a ovest dell'abitato che corrisponde al percorso normale della valanga, l'altro ramo ha invece proseguito in direzione del paese raggiungendo la zona nord-ovest dell'abitato del Breuil alla base del versante, la zona colpita dal flusso valanghivo in cui sono presenti numerose strutture ha un'estensione di circa 30'000 m². Il deposito della valanga era costituito da neve pallottolare e ghiaccio.

7.3.1. Danni:

I danni causati dalla valanga sono stati molto numerosi e hanno compreso anche quattro vittime e alcuni feriti.

Oltre alle perdite umane sono stati danneggiati numerosi edifici, di cui si vedono le foto in Figura 47 e in Figura 48, i quali hanno compreso una decina di condomini, ville e alberghi, è stata completamente distrutta la scuola materna e la caserma della Guardia di Finanza ed è stata resa inagibile la scuola elementare. Sono state inoltre interessate dal flusso la strada comunale e la strada podereale.

In Figura 45 e in Figura 46 è ben visibile l'abbattimento di un traliccio in acciaio da parte della valanga, il traliccio ha subito una rotazione all'altezza dell'ancoraggio. Cadendo il traliccio si è andato ad appoggiare a un edificio piegandosi in un punto un po' più in basso rispetto del punto di contatto con la struttura, il punto della piega è stato probabilmente causato da un punto più debole nella struttura reticolare su cui si sono concentrati gli sforzi.



Figura 45: Foto del traliccio abbattuto (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 46: Ribaltamento di un traliccio nella zona di accumulo dell'evento valanghivo (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 47: Foto edifici danneggiati nell'abitato di Breuil (Catasto regionale valanghe SCT)



Figura 48: Foto edifici danneggiati nell'abitato di Breui (Catasto regionale valanghe SCT).

7.3.2. Foto evento valanghivo:



Figura 49: Vista della nicchia di distacco della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

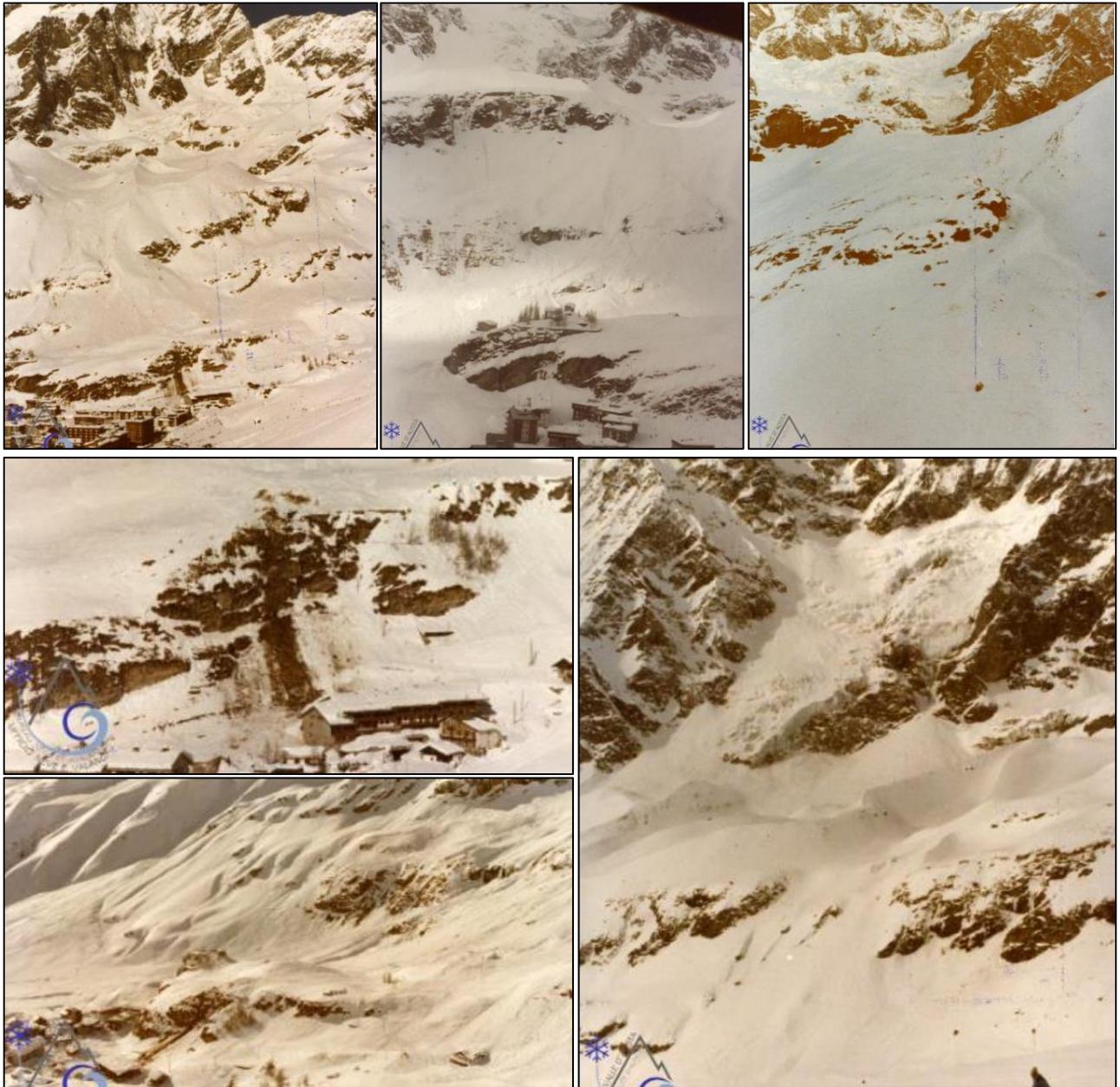


Figura 50: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.4. V-09-038_B

La valanga V-09-038_B (Figura 51) è avvenuta nel comune di Bionaz in località Face Bella (Vagère) sul versante orografico destro della valle.

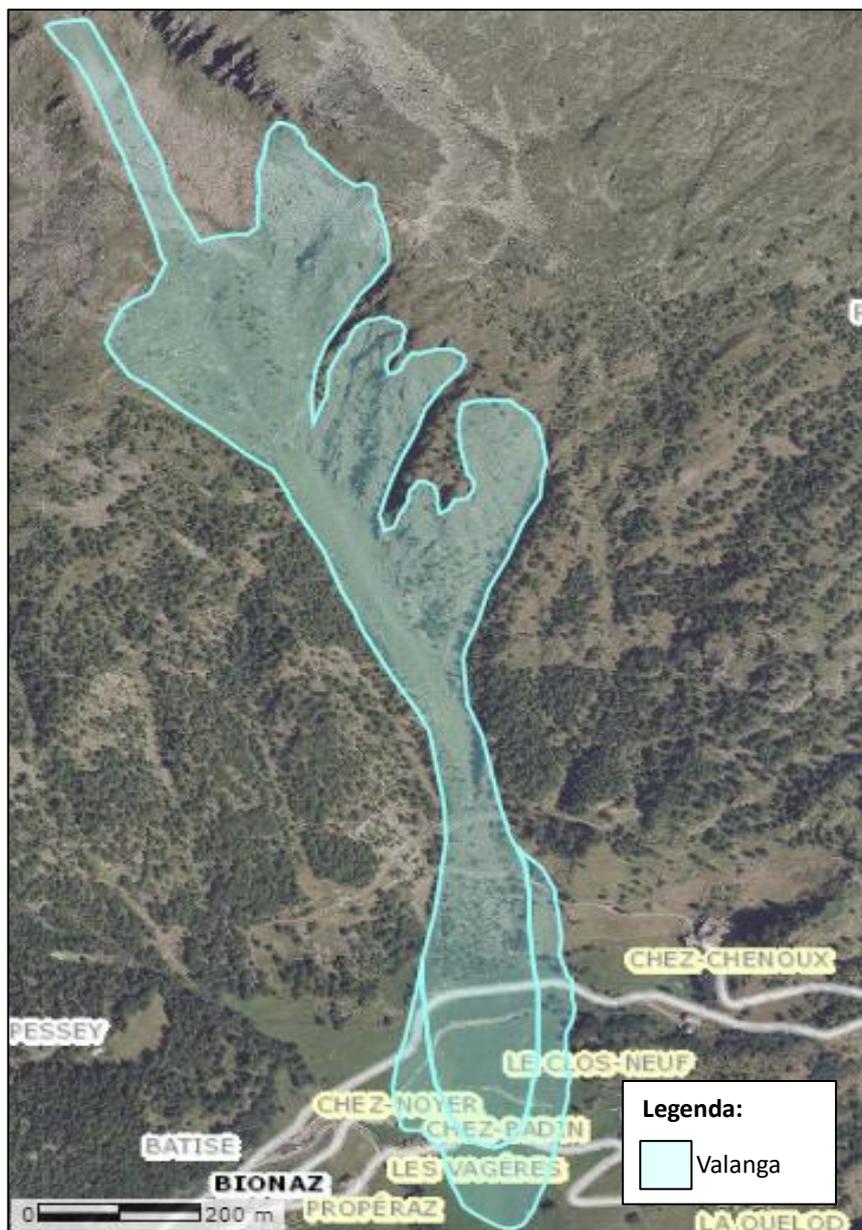


Figura 51: Rappresentazione cartografica della valanga V-09-038_B (Catasto regionale valanghe SCT).

La valanga è caduta il 22/01/2018 in modo spontaneo successivamente a precipitazione piovosa il giorno dell'evento su 51-100 cm di neve fresca presenti nei 2-3 giorni precedenti. Il distacco è stato causato dall'inglobamento di uno strato di brina superficiale da parte di nuove nevicate a partire dal 17 gennaio, lo strato debole è stato inoltre ulteriormente sovraccaricato dalla neve trasportata dal vento.

La valanga iniziata come una valanga a lastroni ad alta coesione ha continuato il suo moto come valanga di tipo misto costituita da neve da umida a bagnata compiendo un percorso avente una lunghezza lineare di 1850 m e un dislivello di 1000 m. È possibile vedere la zona di distacco della valanga in Figura 54 e in Figura 56.

La zona di distacco della valanga, visibile in Figura 55, è collocata in un versante aperto esposto a sud sopra il limite del bosco avente 33° di inclinazione. La linea del distacco lunga 700 m si è formata in una zona in cui sono presenti ponti da neve, probabilmente posizionati in file troppo distanziate le une dalle altre. Il manto nevoso nella zona di distacco aveva uno spessore di 2.5 m, mentre lo strato che si è staccato aveva uno spessore di 0.8 m. Oltre al distacco del lastrone avvenuto in corrispondenza dei ponti da neve si è staccato anche un altro lastrone in un'area a monte delle strutture di protezione, a una quota massima di 2550 m s.l.m., che si è poi raccordato al lastrone che si è distaccato a valle.

L'accumulo della valanga (Figura 57), costituito da neve pallottolare a debole coesione con terra, rami e sassi, si è depositato a una quota minima di 1550 m alla base del canale in zona edificata per un'estensione in lunghezza di 300 m, in larghezza di 200 m e uno spessore di 2 m.

7.4.1. Danni:

In seguito all'evento valanghivo sono stati danneggiati, nella zona di accumulo, i serramenti e i camini di alcuni edifici, guard-rail, staccionate, la casa dell'acquedotto a monte della strada regionale alcuni alberi (Figura 52) anche aventi 100 anni di età. Dall'età degli alberi emerge come la dimensione della valanga sia stata molto maggiore di come si forma di solito.



Figura 52: Alberi abbattuti dalla valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

In Figura 53 si vede un palo di sostegno in lamiera zincata in acciaio a sezione poligonale che è stato abbattuto a causa del danneggiamento della base dello stesso. Confrontando nella foto la dimensione del palo con la mano dell'operatore che ha effettuato il sopralluogo si ipotizza che il palo abbia un diametro compreso tra 25 e 30 cm.



Figura 53: Palo ribaltato nella zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.4.2. Foto evento valanghivo:



Figura 54: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 55: Vista della nicchia di distacco della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 56: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 57: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.5. V-09-065

La valanga V-09-065 (Figura 58) è avvenuta nel comune di Bionaz in località Pointe Baliano Sud-Est sul versante orografico destro della valle.

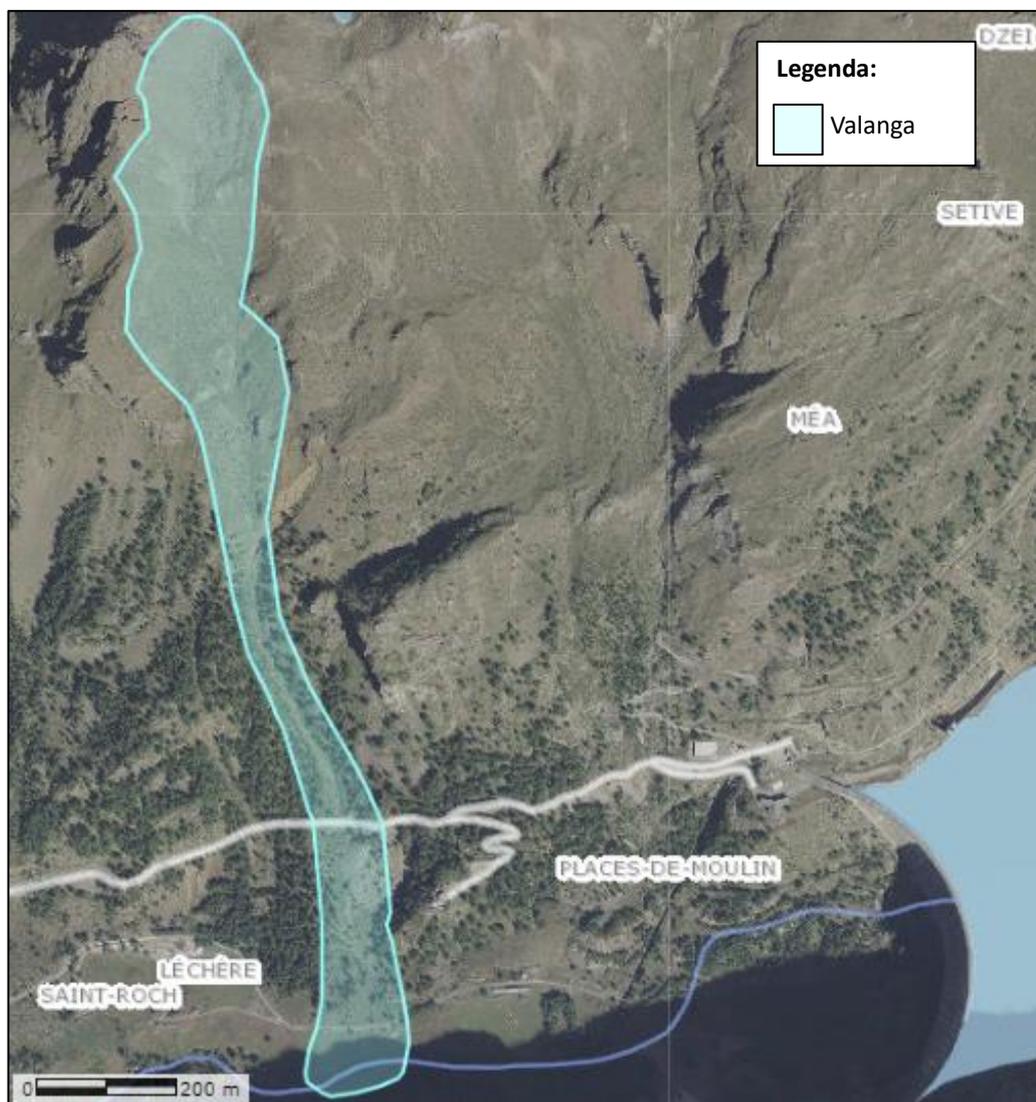


Figura 58: Rappresentazione cartografica della valanga V-09-065 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento è avvenuto in maniera spontanea il 22/01/2018 successivamente a 2-3 giorni in cui vi è stato forte vento mentre al suolo vi erano da 51 a 100 cm di neve fresca, il giorno stesso dell'evento lo strato di neve fresca si era ridotto a uno spessore di 21-50 cm.

La valanga è iniziata come una valanga di superficie a lastroni a elevata coesione e ha continuato in suo moto come una valanga incanalata (Figura 60) di tipo misto costituita da neve asciutta percorrendo un dislivello complessivo di 850 m e una lunghezza lineare di 1600 m.

Il distacco è avvenuto lungo una linea larga 350 m a una quota massima di 2640 m su un versante aperto esposto a sud-est avente un'inclinazione di 25° al di sopra del limite del bosco. Nella nicchia di distacco lo spessore del manto nevoso era di 2.5 m, mentre lo strato che si è staccato aveva uno spessore di 1.5 m.

Il distacco è avvenuto a causa dell'inglobamento nel manto nevoso di uno strato di brina di superficie in seguito a nuove nevicate avvenute a partire dal 17 gennaio. Lo strato debole si trovava a una profondità di 80-120 cm ed è stato sovraccaricato sia da neve ventata sia da neve fresca.

La zona di accumulo, visibile nella Figura 61, si è estesa dalla base del canalone fino a risalire in parte il versante opposto della valle raggiungendo la quota minima di 1790 m e ricoprendo un'area avente lunghezza pari a 90 m e larghezza pari a 150 m. l'accumulo era costituito da neve pallottolare a debole coesione con rami, terra, sassi e numerosi larici che la valanga ha abbattuto nella zona di scorrimento risalendo in parte i lati del canalone in cui è scesa.

7.5.1. Danni:

Oltre ad aver abbattuto numerose piante d'alto fusto la valanga ha anche causato l'abbattimento di un palo in acciaio di sostegno di cavi per il trasporto di corrente elettrica lungo la strada poderale che porta alla base della diga di Place de Moulin, nella zona di accumulo.

In Figura 59 si osserva che il palo è stato spezzato in corrispondenza delle giunzioni tra i profilati metallici cilindrici che lo costituiscono i quali si riducono di diametro andando verso l'alto. Dai punti in cui il palo è stato danneggiato emerge un problema di debolezza dei giunti che ha reso il palo non in grado di sostenere le pressioni esercitate dalla valanga.

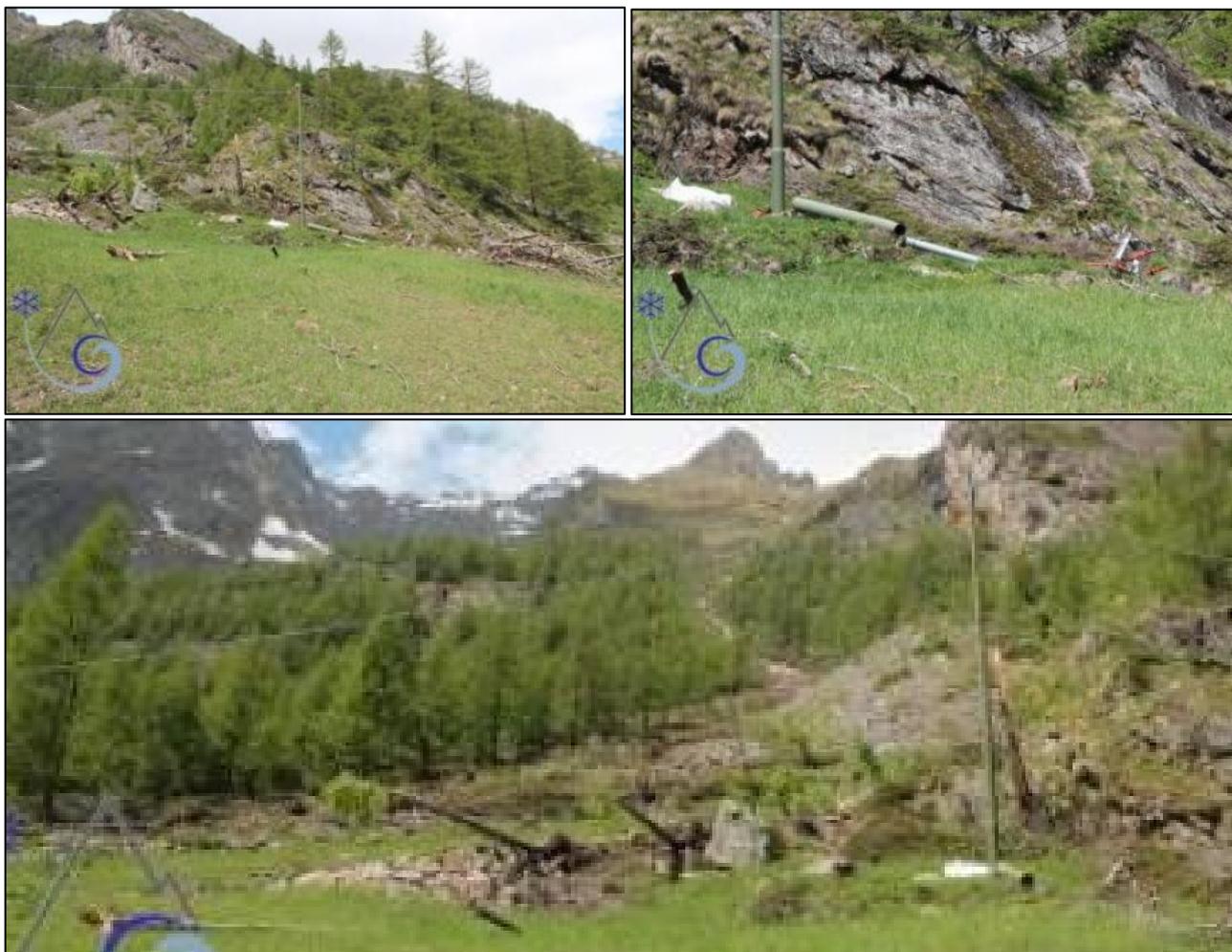


Figura 59: Ribaltamento e rottura di un palo in più parti nella zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.5.2. Foto evento valanghivo:

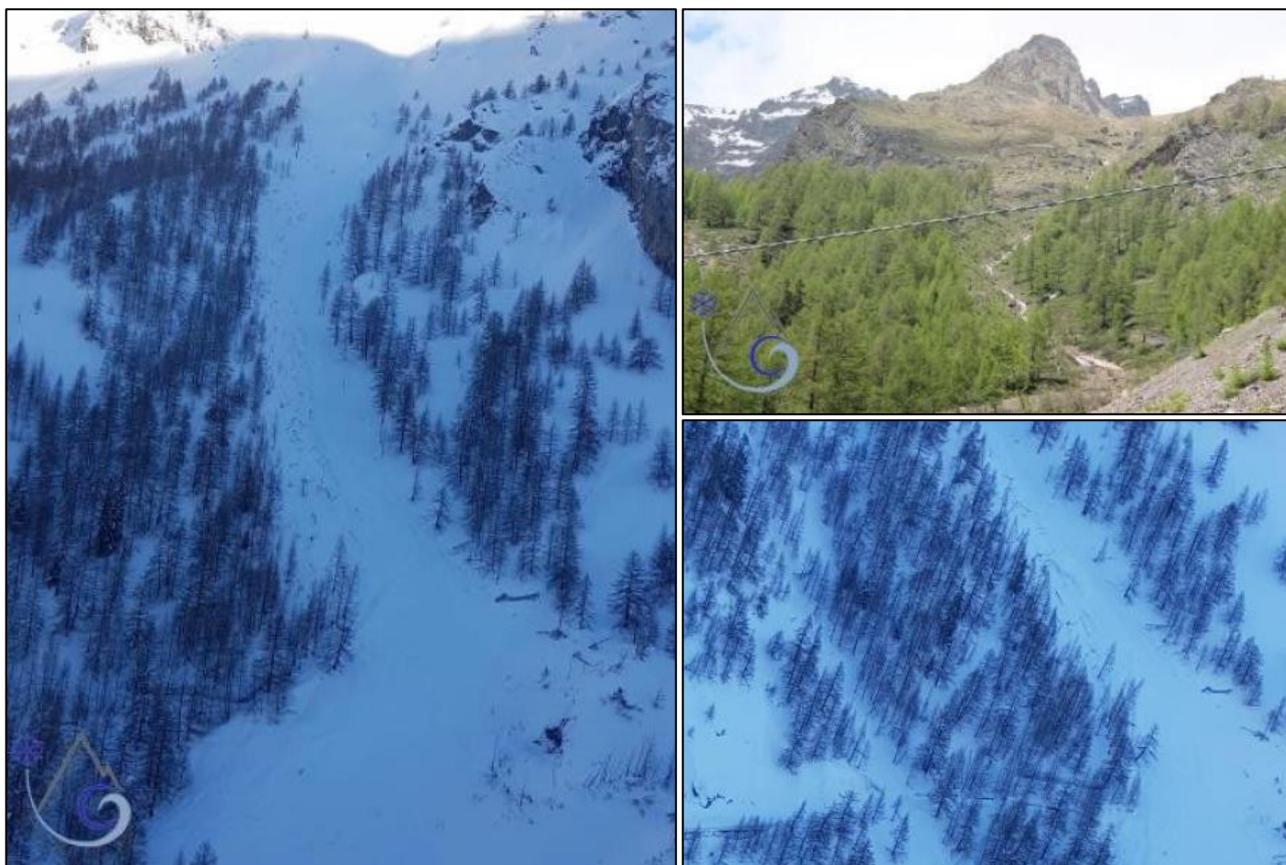


Figura 60: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 61: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.6. V-12-121

La valanga V-12-121 (Figura 62) è avvenuta nel comune di Cogne in località Ronc sul versante orografico destro della valle.



Figura 62: Rappresentazione cartografica della valanga V-12-121 (Catasto regionale valanghe SCT).

La valanga è avvenuta in modo spontaneo il 15/12/2008 dopo che nei 2-3 giorni precedenti vi fosse stato cielo coperto con nevicate che hanno portato al deposito di più di 100 cm di neve fresca, il giorno stesso dell'evento il cielo era ancora coperto e al suolo vi era ancora un deposito di spessore variabile da 51 a 100 cm di neve fresca. Il distacco è avvenuto sia a causa delle nevicate sia a causa di un rialzo delle temperature.

La valanga che si è verificata era di superficie e costituita da neve asciutta, ha compiuto un percorso di 455 m di dislivello in moto misto visibile in Figura 64.

La zona di distacco è costituita in parte da un versante aperto e in parte dall'imbocco dei due canali che costituivano la zona di scorrimento. I due canali si congiungono in località Ronc dopo la quale la valanga ha raggiunto la strada di fondovalle per Lillaz che è stata ostruita per 50 m.

L'accumulo era costituito da neve a debole coesione mista a rami e terra per uno spessore di 3 m. La zona di accumulo che ha raggiunto la quota minima di 1573 m era lunga 90 m e larga 75 m.

7.6.1. Danni:

La valanga ha causato il danneggiamento di alcune piante e l'interruzione della strada per l'abitato di Lillaz, inoltre ha causato l'abbattimento di un palo in lamiera zincata in acciaio di sostegno dei cavi elettrici.

Nella Figura 63 la foto di destra mostra il palo abbattuto subito dopo l'evento valanghivo in cui sembra che abbia subito una rotazione rigida all'altezza della base; dalla foto a sinistra scattata dopo lo scioglimento di parte del manto nevoso si può osservare come in realtà il palo è stato piegato all'altezza del manto nevoso al momento di caduta della valanga. Le foto non consentono di vedere se si tratta di un palo in lamiera zincata a sezione ottagonale o a sezione poligonale; ma, confrontando l'altezza con i larici limitrofi, ha probabilmente un'altezza intorno ai 12 m e quindi potrebbe appartenere sia alla prima sia alla seconda tipologia di struttura di sostegno.



Figura 63: Ribaltamento di un palo di sostegno all'altezza del manto nevoso nella zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.6.2. Foto evento valanghivo:



Figura 64: Sulla sinistra vi è la vista generale del percorso valanghivo, mentre sulla destra vi è la vista della zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.7. V-13-017

La valanga V-13-017 (Figura 65) si è verificata nel comune di Valsavarenche in corrispondenza dell'impluvio a valle del Molère sulla destra orografica della valle. Si è stimato che questa valanga abbia una frequenza di accadimento di una volta ogni 5 anni.



Figura 65: Rappresentazione cartografica della valanga V-13-017 (Catasto regionale valanghe SCT).

La valanga è avvenuta in modo spontaneo il 06/12/2010 con al suolo da 21 a 50 cm di neve fresca.

La valanga che è avvenuta era incanalata ed era costituita da neve asciutta. Il deposito, visibile in Figura 67, era costituito da neve pallottolare a debole coesione con rami, sassi e terra ed ha raggiunto la quota minima di 1173 m oltrepassando la strada regionale di fondovalle. La zona di scorrimento della valanga è visibile in Figura 68.

7.7.1. Danni:

L'unico elemento che è stato danneggiato dalla valanga è stato un traliccio di tipo tronco-piramidale in acciaio di sostegno della linea elettrica di media tensione collocato all'inizio della zona di accumulo. Si può osservare in Figura 66 che la fondazione del traliccio è costituita da un plinto monolitico in c.a. Essendo la fondazione del traliccio un unico plinto a forma di un parallelepipedo si tratta di un traliccio di piccole dimensioni.



Figura 66: Ribaltamento di un traliccio (Catasto regionale valanghe SCT).

Non essendo visibili danni alla vegetazione limitrofa, dalle foto disponibili, probabilmente il danneggiamento del traliccio è stato causato dal tensionamento dei cavi della media tensione da parte della componente nubiforme della valanga, i quali hanno causato la rottura del traliccio all'altezza del manto nevoso.

7.7.2. Foto evento valanghivo:



Figura 67: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 68: Vista della zona di scorrimento e della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.8. V-13-39

La valanga V-13-39 (Figura 69) si è verificata nel comune di Valsavarenche in località Les Thoules sul versante orografico destro della valle. Si è stimato che l'evento si verifichi almeno una volta ogni 30 anni.



Figura 69: Rappresentazione cartografica della valanga V-13-039 (Catasto regionale valanghe SCT).

La valanga è avvenuta il 15/12/2008 tra le ore 12 e le 18. Sia nei 2-3 giorni precedenti sia il giorno stesso dell'evento vi è stato vento moderato e al suolo vi erano oltre 100 cm di neve fresca nei 2-3 giorni precedenti all'evento che si sono ridotti a 21-50 cm il giorno stesso dell'evento. A staccarsi è stato lo strato più superficiale costituito da neve fresca e neve ventata che poggiava su strati di neve più vecchia che hanno costituito il piano di scivolamento.

La valanga si è distaccata su un versante aperto esposto a ovest lungo una linea a una quota massima di 2431 m s.l.m., visibile in Figura 75, ed era costituita da neve asciutta, è iniziata come una valanga a lastroni ad elevata coesione che ha continuato la sua discesa a valle in moto di tipo misto incanalato per un dislivello di 898 m. Nella zona di scorrimento (Figura 72 e Figura 74) la valanga ha recato danni a un traliccio.

La zona di accumulo, visibile in Figura 73, si estende dalla base del canalone fino a raggiungere il torrente a una quota minima di 1533 m s.l.m., l'accumulo era costituito da neve a debole coesione con rami, terra e sassi.

7.8.1. Danni:

La valanga ha causato la distruzione o il forte danneggiamento di sei edifici (Figura 70) e altri sette edifici sono stati danneggiati in modo meno grave, sono state distrutte anche delle auto che erano parcheggiate e sono stati danneggiati lievemente il bosco e un traliccio di tipo tronco a Y in acciaio dell'alta tensione. Stranamente alcune case che si trovavano in mezzo alla zona colpita dal soffio della valanga non sono state danneggiate probabilmente grazie alla diversa orientazione rispetto alla direzione del flusso della valanga.

In Figura 71 sono messi in evidenza i danni subiti dal traliccio, da esse emerge che i danni sono stati causati da elementi più duri come rami inglobati nel flusso. Questi elementi esercitano picchi di pressione molto superiore rispetto alla pressione media esercitata dalla valanga, per questo hanno danneggiato singoli punti del traliccio interessati dall'impatto senza causare l'abbattimento dell'intero traliccio. Basandosi sulla dimensione che deve avere la parte del traliccio che sostiene i cavi l'intero traliccio deve avere un'altezza totale di circa 30 m.



Figura 71: Foto del traliccio danneggiato dalla valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 70: Edifici fortemente danneggiati nella zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.8.2. Foto evento valanghivo:



Figura 72: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

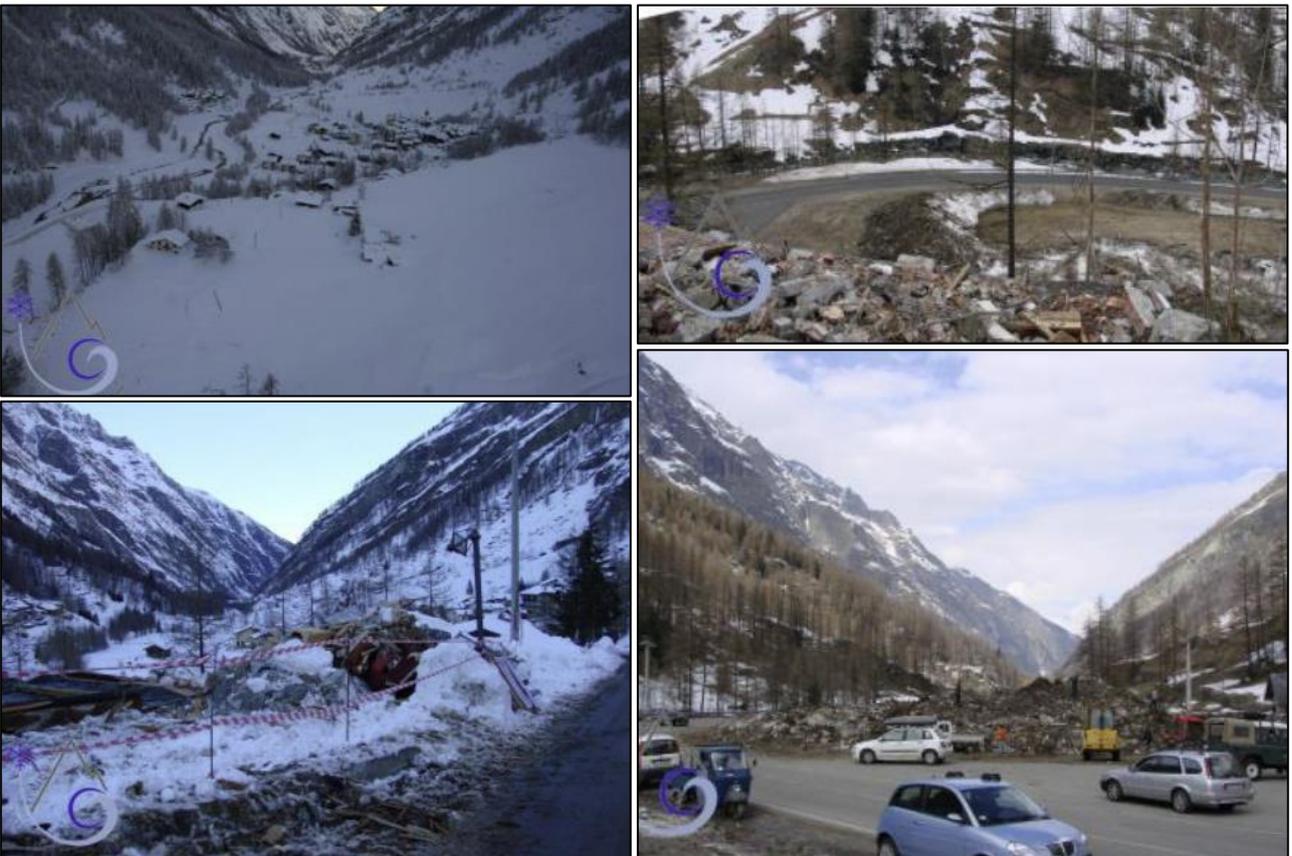


Figura 73: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 74: Vista generale del percorso valanghivo (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 75: Vista della zona di distacco della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.9. V-13-066 e V-13-067

La valanga V-13-066 (Figura 76) è avvenuta nel comune di Valsavarenche in località Aouille sul versante orografico destro, mentre la valanga V-13-067 è scesa in località Pont Diuan sul versante orografico sinistro. Entrambe le valanghe cadute in maniera spontanea sono avvenute il 08/01/2018 andando a formare un unico deposito valanghivo (Figura 78) che non permette di distinguere quale delle due valanghe abbia causato i danni che si sono osservati.

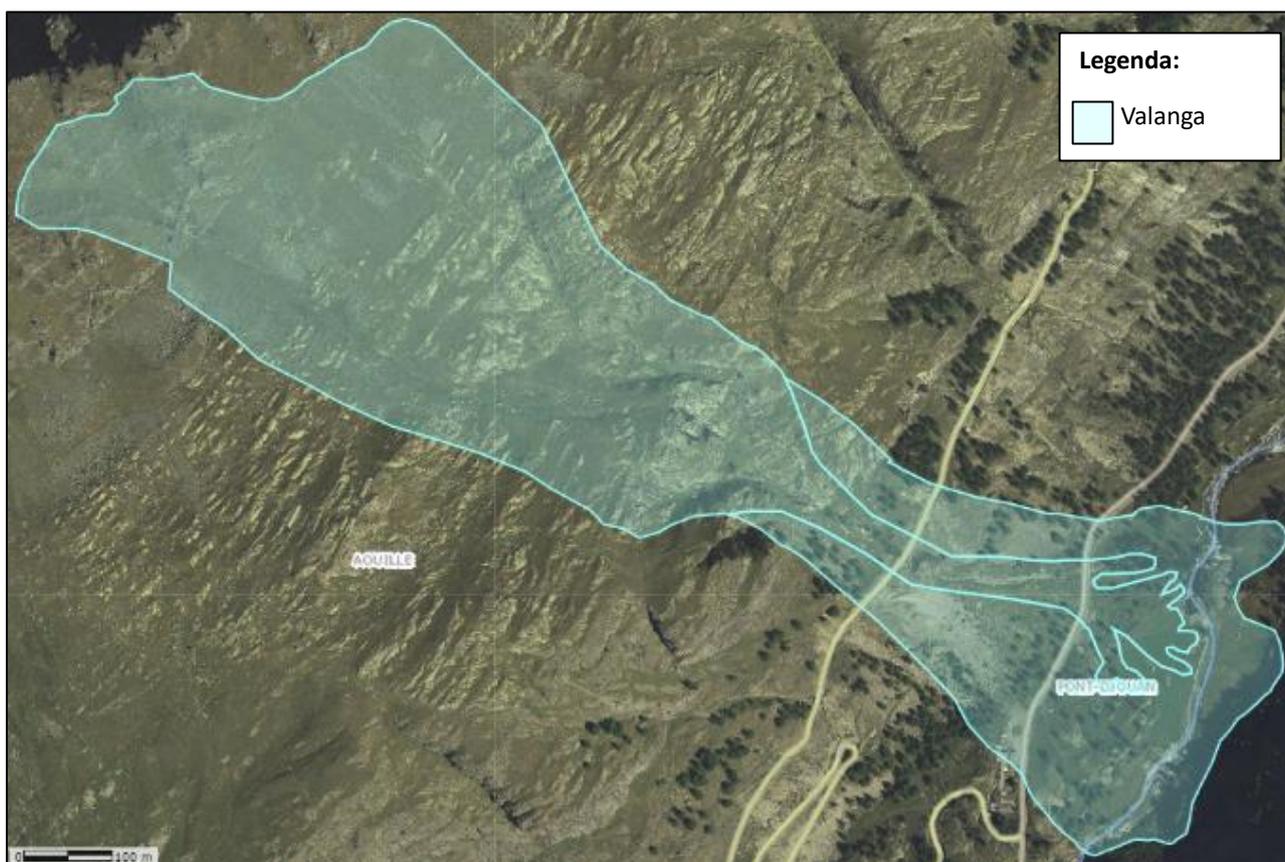


Figura 76: Rappresentazione cartografica della valanga V-13-067 (Catasto regionale valanghe SCT).

Le valanghe sono avvenute successivamente a precipitazioni nevose che hanno portato a passare dalla presenza da 21 a 50 cm di neve fresca al suolo nei 2-3 giorni precedenti l'evento a 51-100 cm di neve fresca il giorno in cui si è verificato. Nei giorni precedenti agli eventi vi è anche stato vento forte che ha facilmente portato alla formazione di accumuli e impedendo alle nevicate di formare un manto di spessore all'incirca uniforme in spessore.

La valanga n. 66 è una valanga di fondo scesa con moto radente e costituita da neve da umida a bagnata, la zona di scorrimento è visibile in Figura 79.

La valanga n. 67 è una valanga di superficie costituita da neve asciutta iniziata come una valanga a lastroni duri ad elevata coesione successivamente scesa in moto misto lungo un percorso avente una lunghezza lineare di 1500 m e un dislivello complessivo di 960 m. È visibile la nicchia di distacco in Figura 80 e la zona di scorrimento in Figura 81 e in Figura 82.

7.9.1. Danni:

Dalle foto in Figura 77 sembrerebbe che siano stati abbattuti due tralicci di tipo tronco a Y in acciaio dell'alta tensione nella zona di accumulo, non vedendo danni alla vegetazione limitrofa ai tralicci dalle immagini disponibili si suppone che l'abbattimento dei tralicci sia stato causato dal tensionamento dei cavi da parte della componente polverosa della valanga.



Figura 77: Ribaltamento di due tralicci nella zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.9.2. Foto zona di accumulo eventi valanghivi n. 66 e n. 67



Figura 78: Vista della zona di accumulo in comune ai due eventi valanghivi (Catasto regionale valanghe SCT).

7.9.3. Foto evento valanghivo n. 66



Figura 79: Vista della zona di scorrimento e della zona di accumulo della valanga n. 66 (Catasto regionale valanghe SCT).

7.9.4. Foto evento valanghivo n. 67

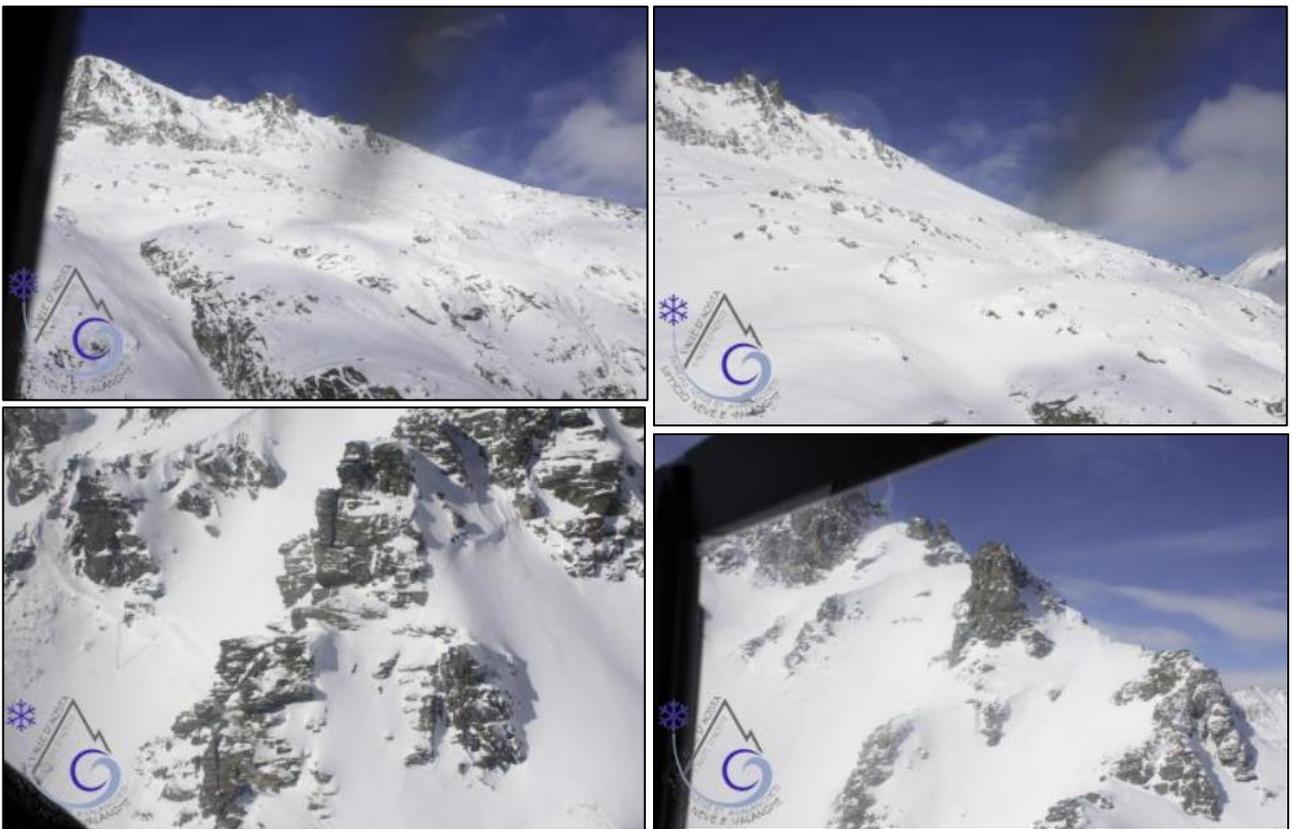


Figura 80: Vista della zona di distacco della valanga n. 67 (Catasto regionale valanghe SCT).

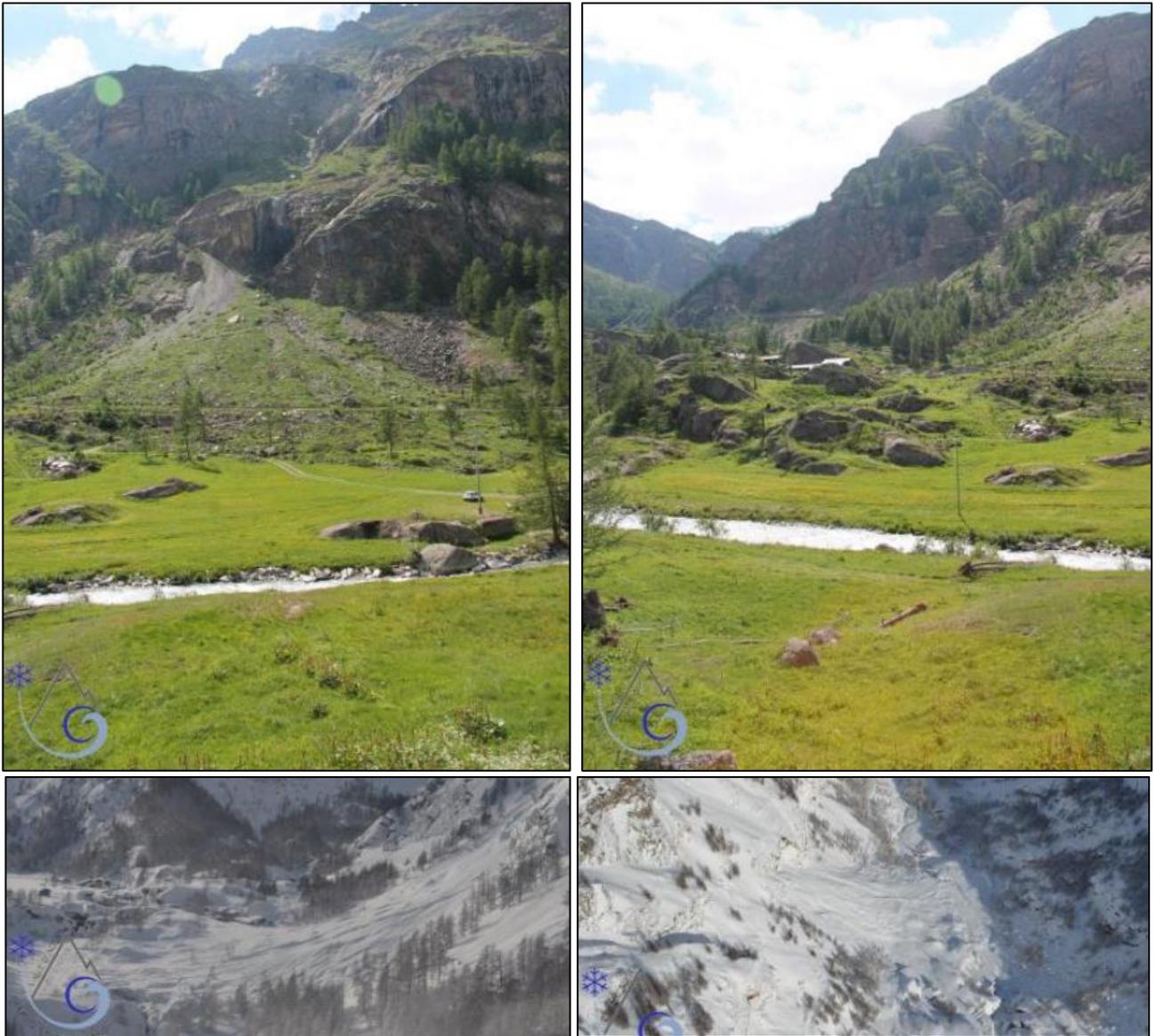


Figura 81: Vista della zona di scorrimento e della zona di accumulo della valanga n. 67 (Catasto regionale valanghe SCT).

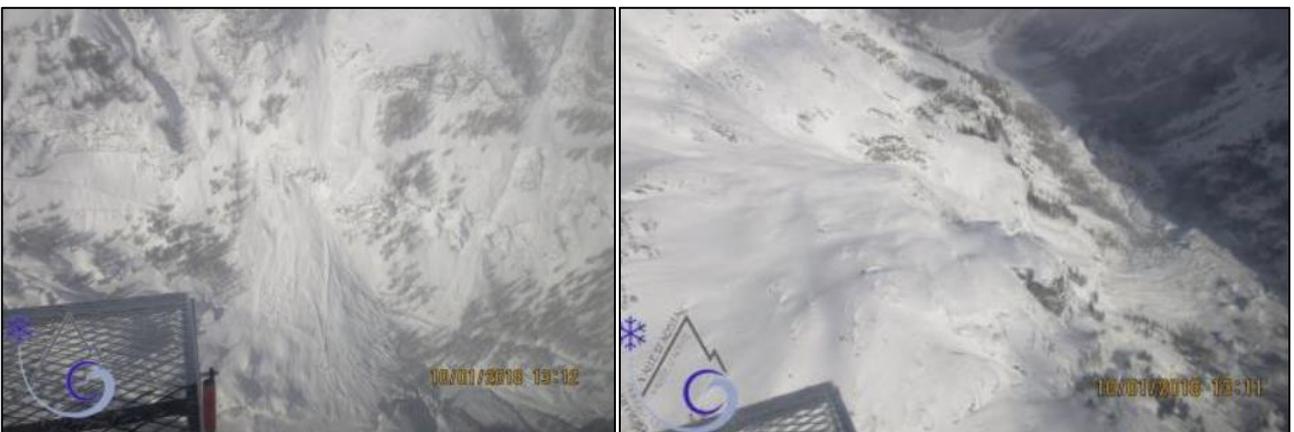


Figura 82: Vista della zona di scorrimento della valanga n. 67 (Catasto regionale valanghe SCT).

7.10. V-14-054

La valanga V-14-054 (Figura 83) è avvenuta nel comune di Rhêmes -Notre-Dame in località Artalle sul versante orografico destro della valle. Si è stimato che la valanga avvenga una o più volte all'anno.



Figura 83: Rappresentazione cartografica della valanga V-14-054 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento valanghivo si è verificato in maniera spontanea il 20/04/2018 alle ore 17:35 dopo giorni in cui si è verificato un innalzamento delle temperature anche di notte, anche se sopra i 2000 m s.l.m. si è verificato un buon rigelo notturno grazie a notti serene.

La valanga che si è verificata era una valanga di fondo composta da neve da umida a bagnata, è iniziata nella nicchia di distacco, visibile in Figura 85, come valanga a lastroni duri ad elevata coesione ed ha continuato la sua discesa nella zona di scorrimento, visibile in Figura 86, con moto radente lungo un percorso avente una lunghezza lineare di 2300 m e un dislivello complessivo di 1330 m. Una volta giunta nella zona di accumulo (Figura 87) la valanga ha causato il ribaltamento di un traliccio.

7.10.1. Danni:

Una volta giunta nella zona di accumulo la valanga ha causato il ribaltamento di un traliccio di tipo tronco-piramidale in acciaio. Dalla foto in Figura 84 sembrerebbe che il traliccio sia stato divelto dalla base e trasportato più a valle dal flusso valanghivo.



Figura 84: Ribaltamento di un traliccio nella zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.10.2. Foto evento valanghivo:



Figura 85: Vista della zona di distacco della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 86: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 87: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.11. V-16-009

La valanga V-16-009 (Figura 88) si è verificata nel comune di Prè-Saint-Didier in località Torrent de La Bouche sul versante orografico sinistro della valle.

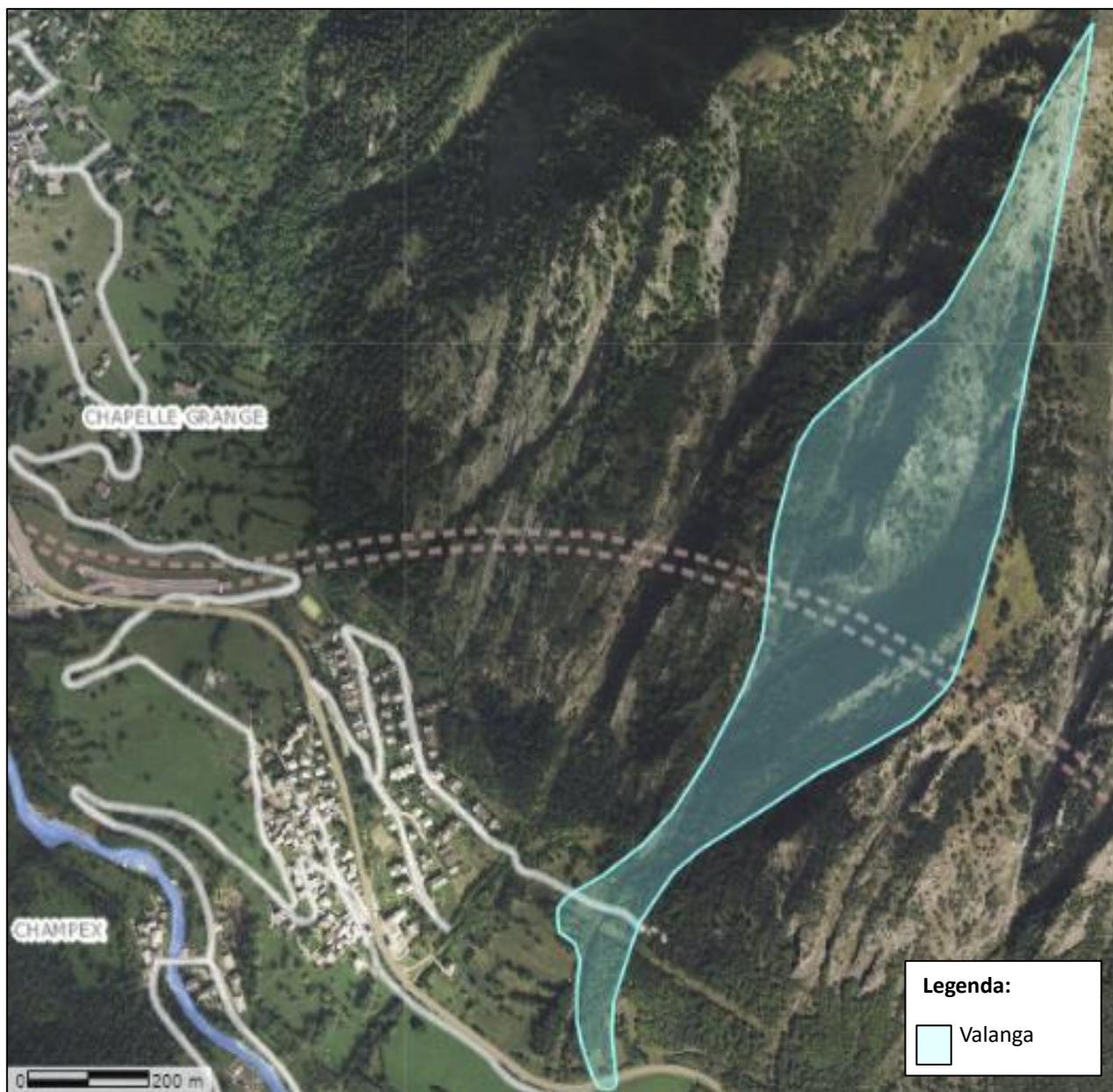


Figura 88: Rappresentazione cartografica della valanga V-16-009 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento valanghivo si è verificato il 22/01/1980 in modo spontaneo. La valanga che si è verificata era una valanga di fondo costituita da neve da umida a bagnata lungo un percorso valanghivo, visibile in Figura 90, avente 1220 m di dislivello. L'accumulo della valanga è visibile in Figura 91.

7.11.1. Danni:

Il soffio della valanga ha causato il tensionamento di cavi dell'alta tensione che a loro volta hanno fatto ruotare la parte sommitale di un traliccio di tipo tronco-piramidale in acciaio visibile nella Figura 89.



Figura 89:Traliccio danneggiato dalla valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.11.2. Foto evento valanghivo:



Figura 90: Vista generale del percorso valanghivo (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 91: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.12. V-19-054

La valanga V-19-054 (Figura 92) è avvenuta nel comune di Courmayeur partendo da sotto La Tour Ronde e scendendo lungo il Glacier de la Brenva sulla sinistra orografica della Val Veny.

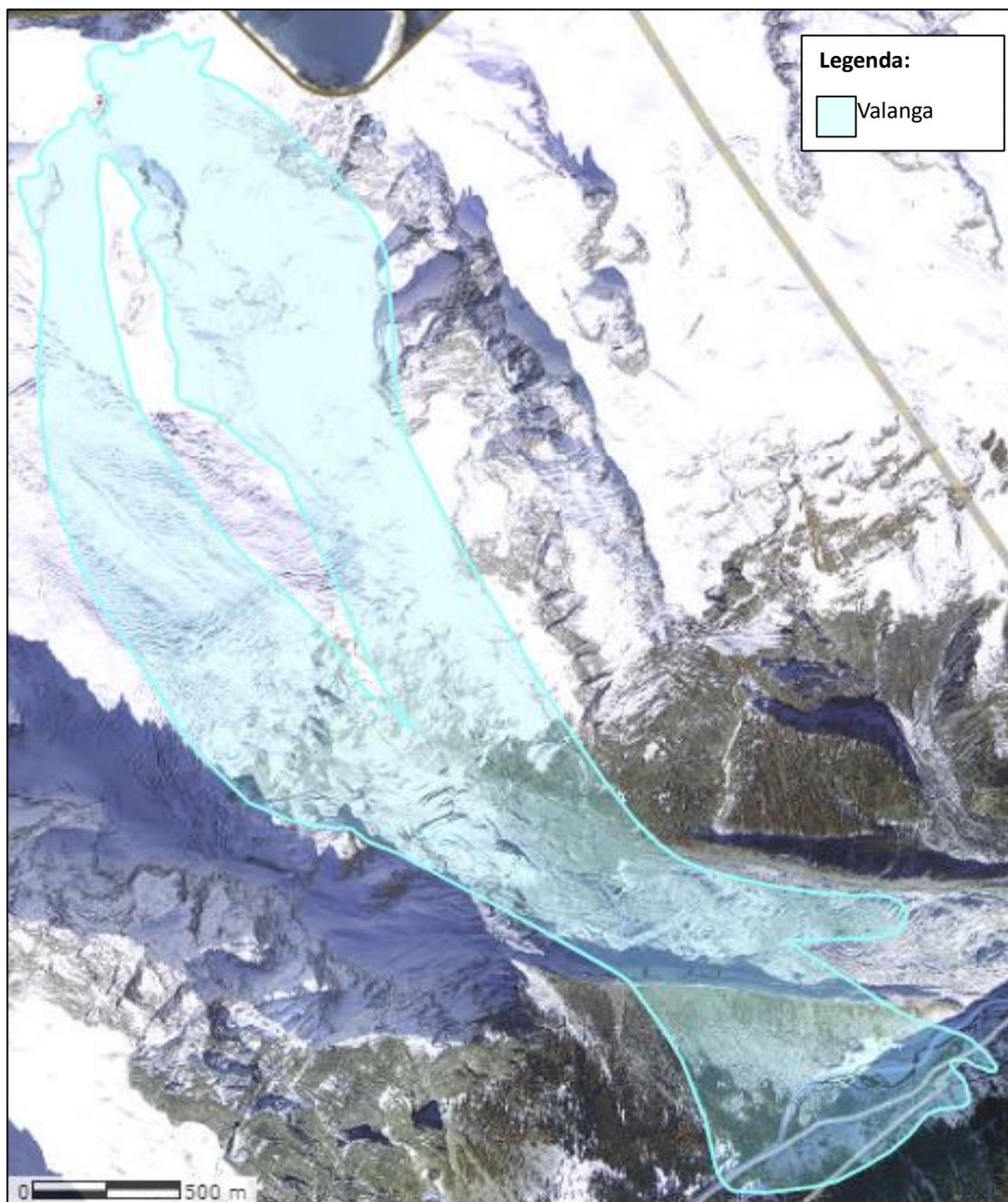


Figura 92: Rappresentazione cartografica della valanga V-19-054 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento si è verificato in maniera spontanea il 29/01/1995 in condizioni di cielo nuvoloso e con al suolo, nei 2-3 giorni precedenti, da 21 a 50 cm di neve fresca al suolo. Il distacco è stato causato da un rialzo delle temperature.

La valanga che si è verificata è una valanga di superficie costituita da neve asciutta, è iniziata come valanga a lastroni ad elevata coesione e ha continuato la sua discesa con moto di tipo misto lungo un percorso avente lunghezza lineare di 4800 m e un dislivello complessivo di 2100 m. La zona di scorrimento della valanga è visibile in Figura 96.

La zona di distacco, visibile in Figura 94, era collocata a una quota massima di 3650 m su un versante aperto esposto a sud con un'inclinazione di 45°. La superficie di distacco copriva un'area di 25 ha con una larghezza della linea di distacco di 1000 m, in manto nevoso era spesso 3 m e la superficie di scivolamento si trovava a 2.5 m di profondità.

La zona di accumulo, visibile in Figura 97, era molto estesa: 600 m in lunghezza e 100 m in larghezza e ha raggiunto la quota minima di 1550 m. La componente densa della valanga, costituita da neve a debole coesione mista a sassi., è stata fermata dalla morena laterale del ghiacciaio della Brenva, mentre la componente polverosa ha proseguito, come si vede in Figura 95, andando a causare numerosi danni sul versante opposto della Val Veny raggiungendo puntualmente anche 2000 m s.l.m. sotto il Mont Chetif.

7.12.1. Danni:

Il soffio della valanga ha distrutto 18 ha di bosco e 1000 m di linea elettrica e telefonica.

Nella zona di accumulo il soffio della valanga ha causato il ribaltamento di un traliccio di tipo tronco-piramidale in acciaio visibile in Figura 93. Il traliccio si trovava sul versante opposto della valle rispetto al pendio da cui era scesa la valanga, ma è stato raggiunto dal soffio che lo ha ribaltato rompendo gli ancoraggi col plinto di fondazione. La foto invernale mostra il traliccio nella posizione dopo l'abbattimento da parte del soffio della valanga, mentre la foto estiva mostra molto probabilmente lo stesso traliccio dopo essere stato spostato lateralmente alla strada della Val Veny per consentire il passaggio dei mezzi. La posizione del traliccio nella foto estiva, fosse nella posizione originale dopo l'evento, risulterebbe molto insolita in quanto il soffio fa sì che la parte sommitale venga rivolta a indicare la direzione del flusso sia nell'abbattimento degli alberi sia nell'abbattimento dei tralicci; perciò, in questo caso la sommità del traliccio dovrebbe essere rivolta verso monte, mentre in quella foto risulta in direzione opposta.



Figura 93: Traliccio abbattuto dal soffio della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.12.2. Foto evento valanghivo:



Figura 94: Vista della nicchia di distacco (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 95: Vista della componente nubiforme della valanga che risale il versante opposto della valle (Catasto regionale valanghe SCT).

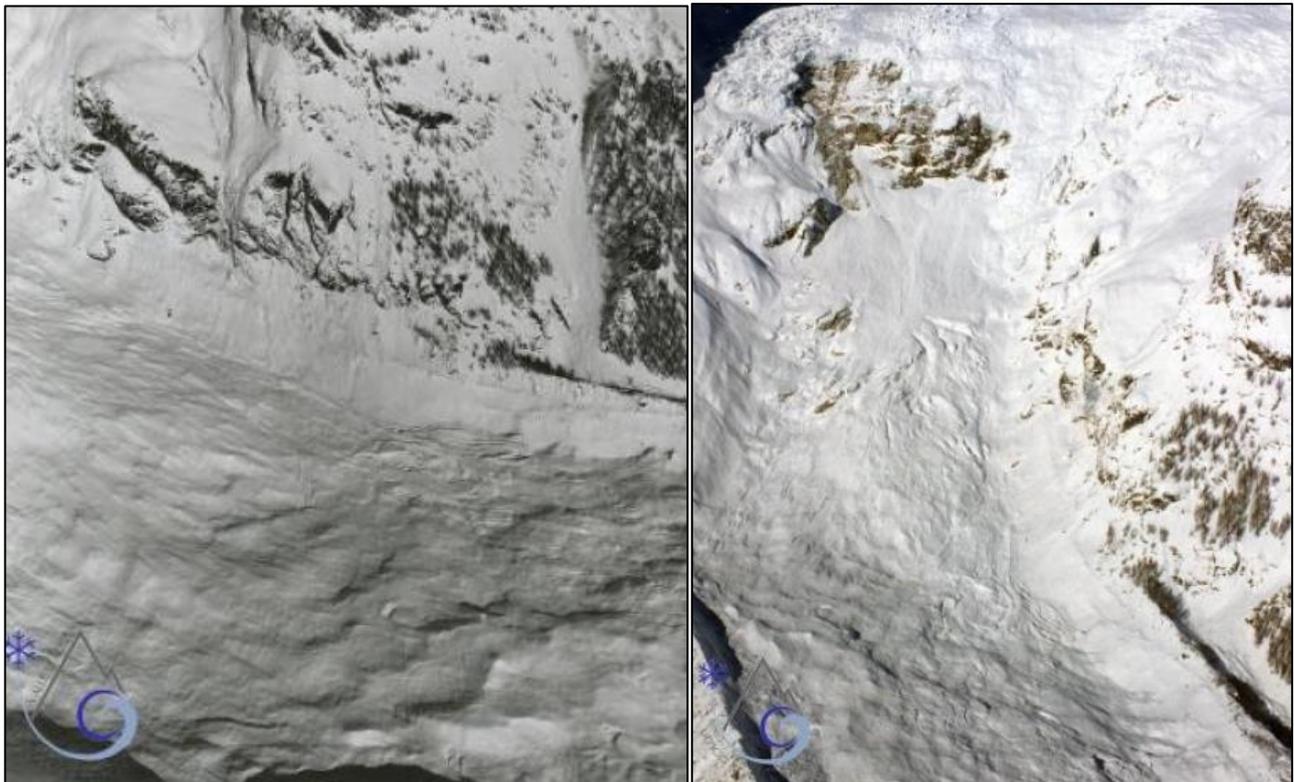


Figura 96: Vista della zona di scorrimento della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

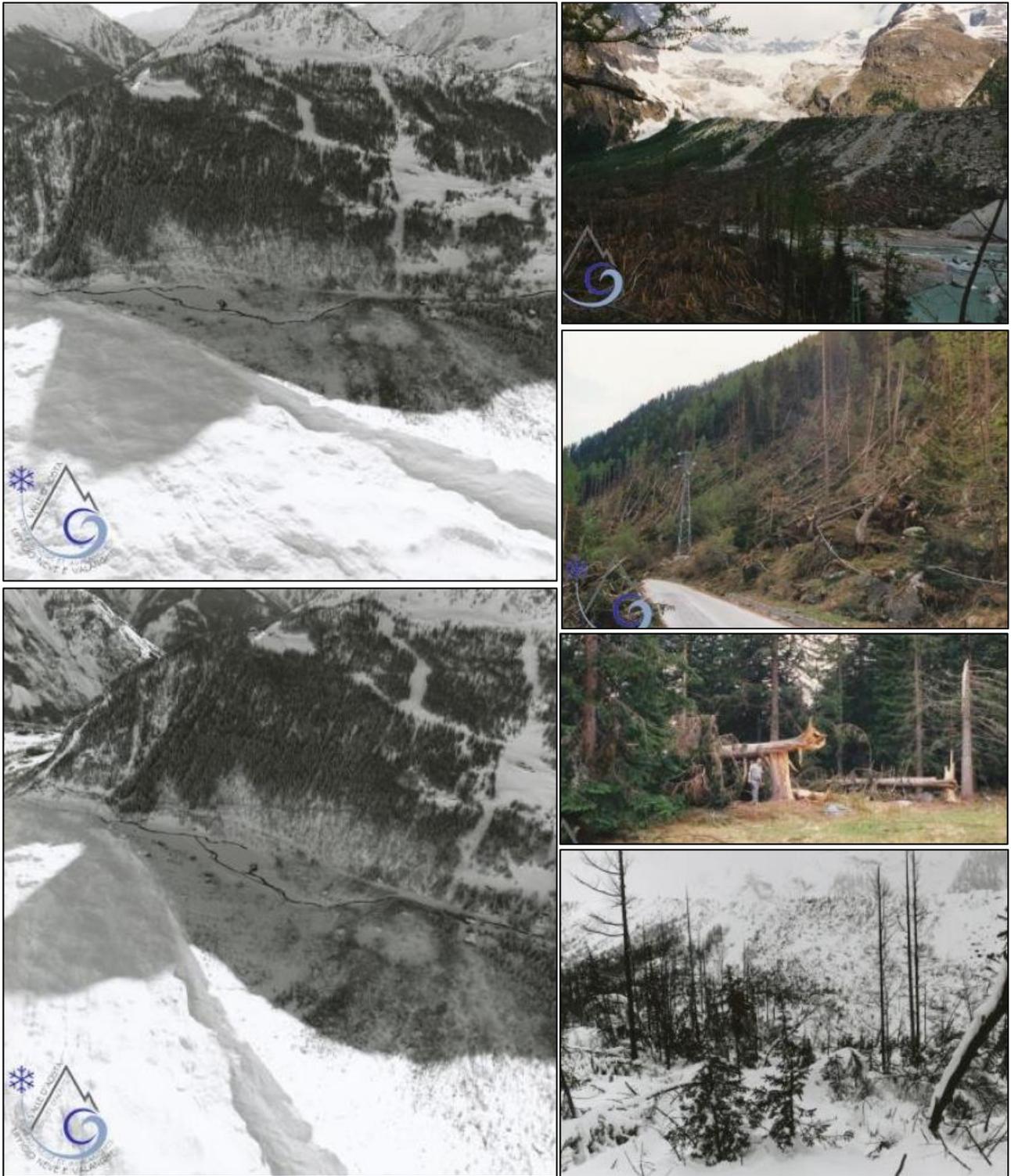


Figura 97: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

7.13. V-19-114

La valanga V-19-114 (Figura 98) è collocata nel comune di Courmayeur, si è innescata in seguito a una frana sul Pic Moore ed è scesa lungo il ghiacciaio della Brenva sul versante idrografico sinistro della Val Veny.

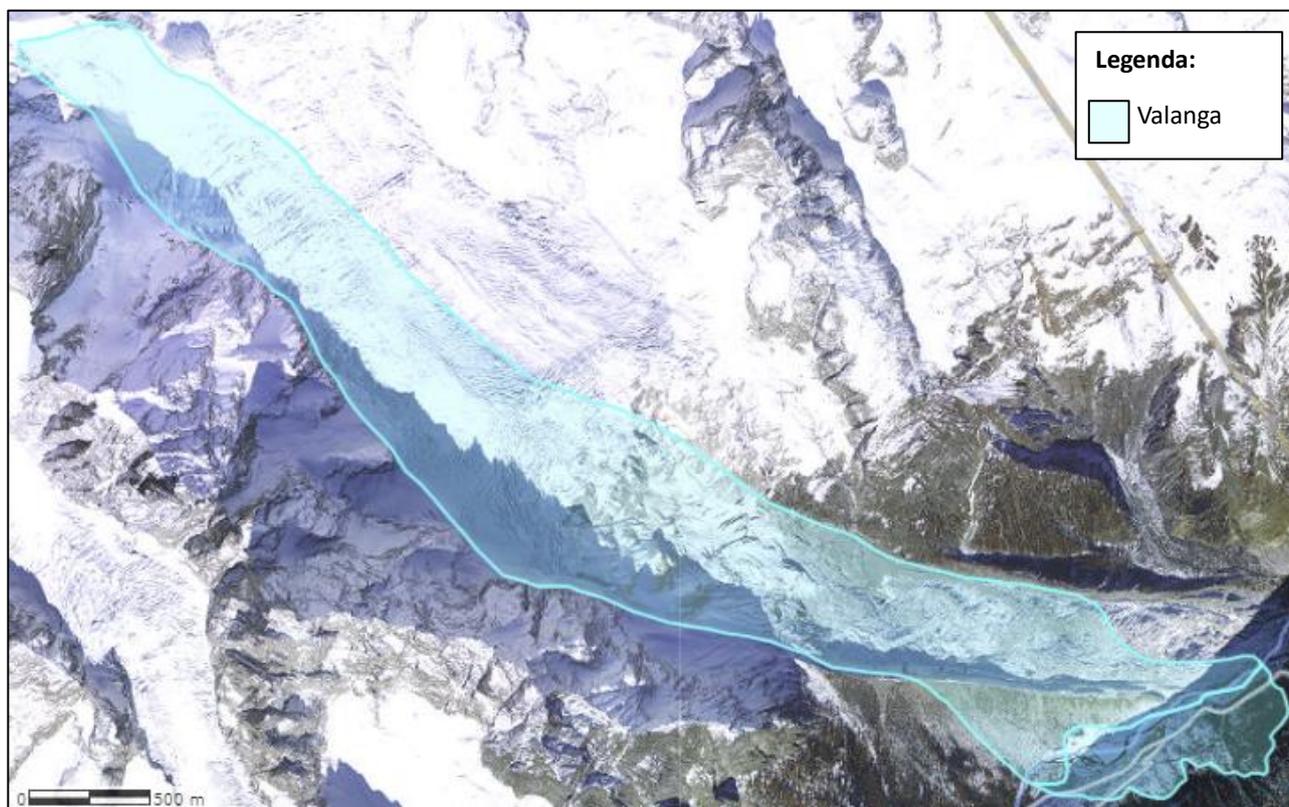


Figura 98: Rappresentazione cartografica della valanga V-19-114 (Catasto regionale valanghe SCT).

L'evento si è verificato il 18/01/1997 alle 14:55 durante una giornata con cielo sereno. La valanga che si è verificata è una valanga di fondo di neve asciutta iniziata come una valanga a lastroni duri ad elevata coesione che si è sviluppata in un moto di tipo misto lungo un percorso, visibile in Figura 105, avente una lunghezza lineare di 6000 m e un dislivello complessivo di 2290 m. In Figura 102 è possibile vedere le foto di più istanti della valanga in caduta lungo il suo percorso.

La zona di distacco della valanga, visibile in Figura 103, si trova su un pendio aperto di 45° di inclinazione esposto a sud-est, la larghezza del distacco era di 550 m a una quota massima di 3690 m. La valanga si è formata a causa del crollo della cresta di roccia sovrastante il ghiacciaio della Brenva a 3700 m sulla nicchia di distacco tra il Col Moore e il Glacier du Gendarme Rouge.

La valanga di dimensioni eccezionali ha raggiunto la quota minima di 1400 m e ha generato un accumulo di 20 m di spessore largo 1500 m e lungo 900 m costituito da neve pallottolare a debole coesione mista a ghiaccio, rami, terra e sassi visibile in Figura 104. La componente polverosa della valanga ha risalito per un lungo tratto il versante opposto della Val Veny e in Figura 106 si possono vedere i segni del suo passaggio.

7.13.1. Danni:

La valanga avvenuta all'improvviso in seguito al distacco della valanga ha causato due vittime tra gli sciatori che stavano percorrendo la pista di rientro colpita in pieno dal soffio della valanga che è giunto poco distante dall'imbocco del traforo del Monte Bianco.

La componente radente, al contrario dell'evento del 1995, non è stata completamente trattenuta dalla morena del ghiacciaio della Brenva andando a travolgere le strutture della cava di inerti in località Plan Ponquet (Figura 100) ed è arrivata a sfiorare l'albergo Val Veny (Figura 101) oltrepassando il torrente Dora di Val Veny.

Nella zona di accumulo il soffio della valanga ha causato il ribaltamento di due tralicci di tipo tronco-piramidale in acciaio, visibili in Figura 99, e di numerosissimi alberi alcuni dei quali sono andati a loro volta a colpire degli edifici.

Uno dei due tralicci è stato ribaltato alla base, come gli alberi circostanti, dal soffio della valanga; il secondo traliccio si trovava probabilmente in una zona più laterale in cui il soffio non è stato in grado di causare il ribaltamento dello stesso a partire dalla base, ma il ribaltamento è avvenuto piegando il traliccio all'altezza del manto nevoso. Probabilmente il secondo traliccio è stato danneggiato in seguito all'abbattimento del primo traliccio che ha portato al tensionamento dei cavi che a loro volta hanno abbattuto il secondo traliccio.



Figura 99: Due tralicci ribaltati nella zona di accumulo (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 100: Sulla sinistra si vede la cava di inerti in località Plan Ponquet, mentre sulla destra si osserva un edificio danneggiato (Catasto regionale valanghe SCT).



Figura 101: Foto danni all'Albergo Val Veny (Catasto regionale valanghe SCT).

7.13.2. Foto evento valanghivo:



Figura 102: Vista dell'evento valanghivo in atto (Catasto regionale valanghe SCT).

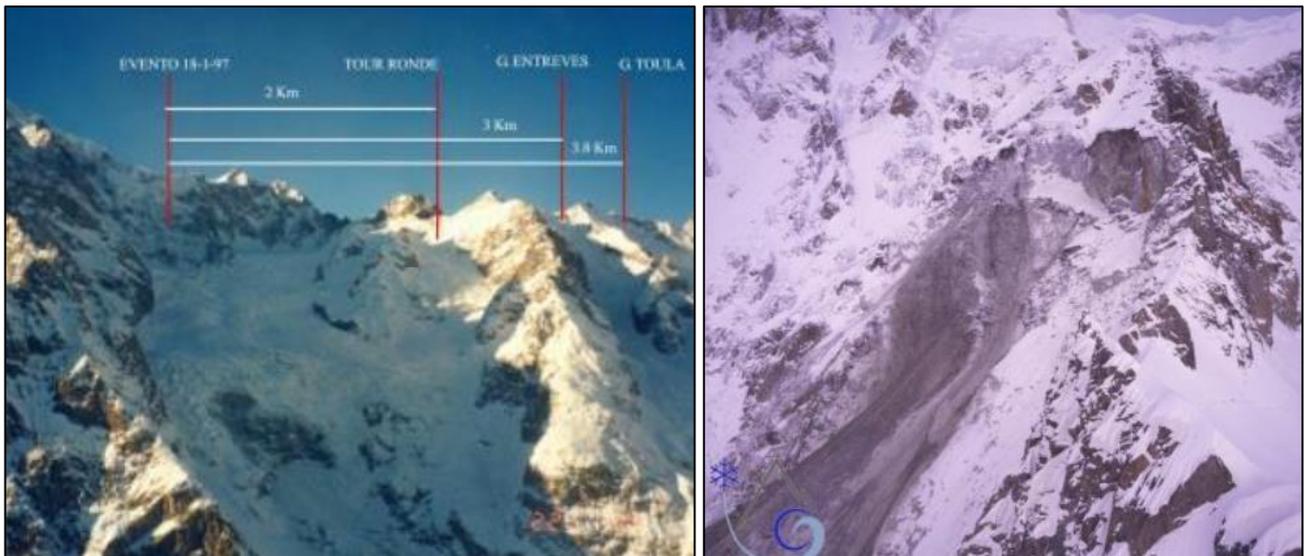


Figura 103: Vista della nicchia di distacco della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

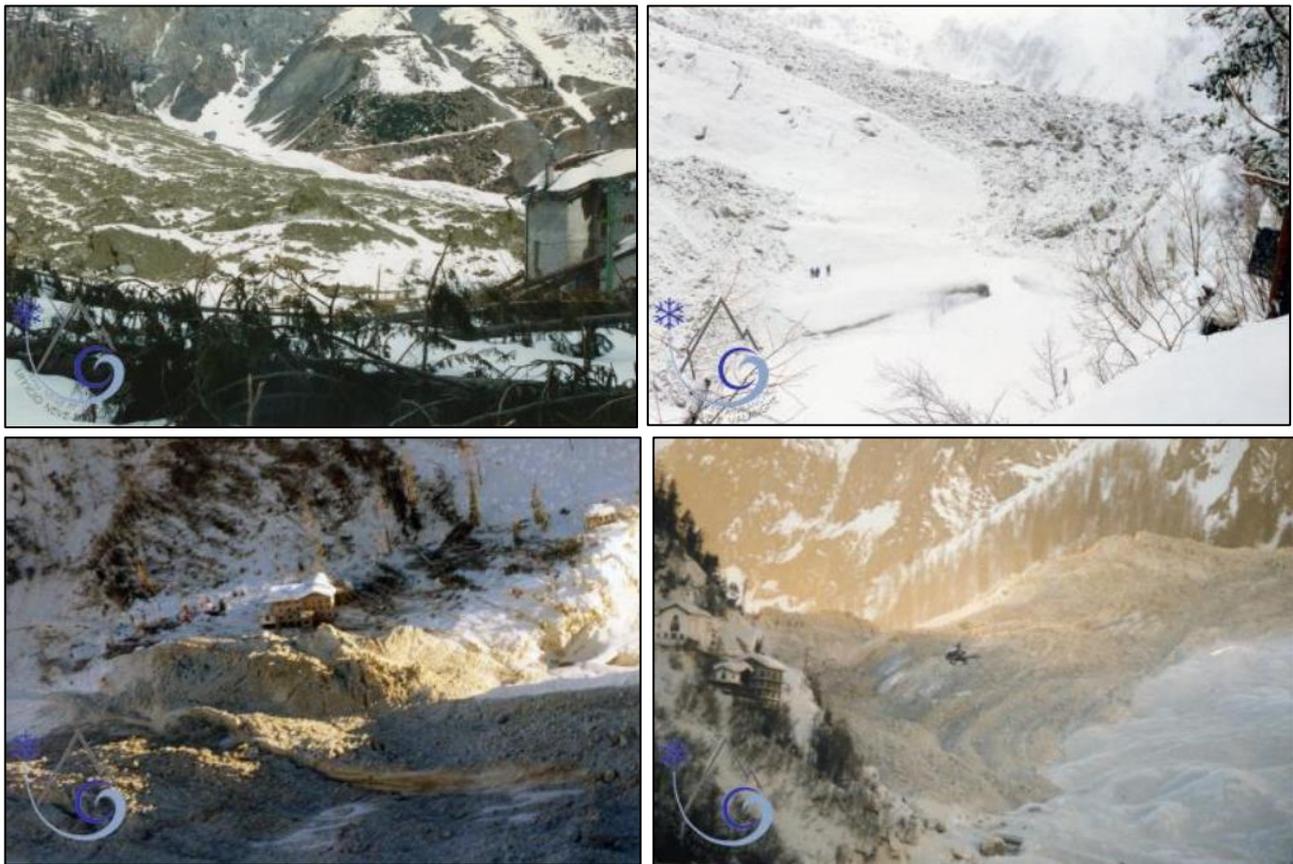


Figura 104: Vista della zona di accumulo della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

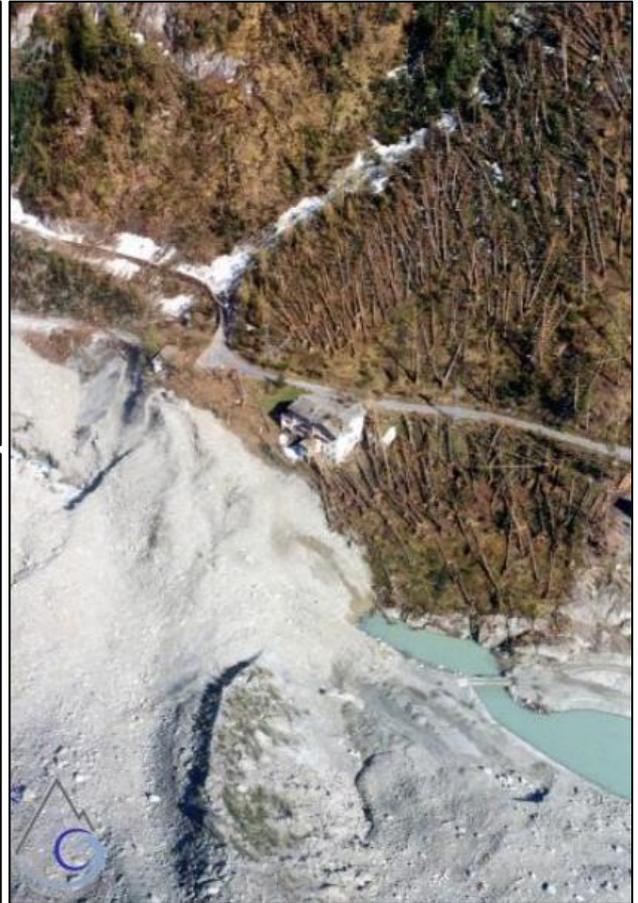


Figura 106: Vista della zona di arrivo del soffio della valanga (Catasto regionale valanghe SCT).

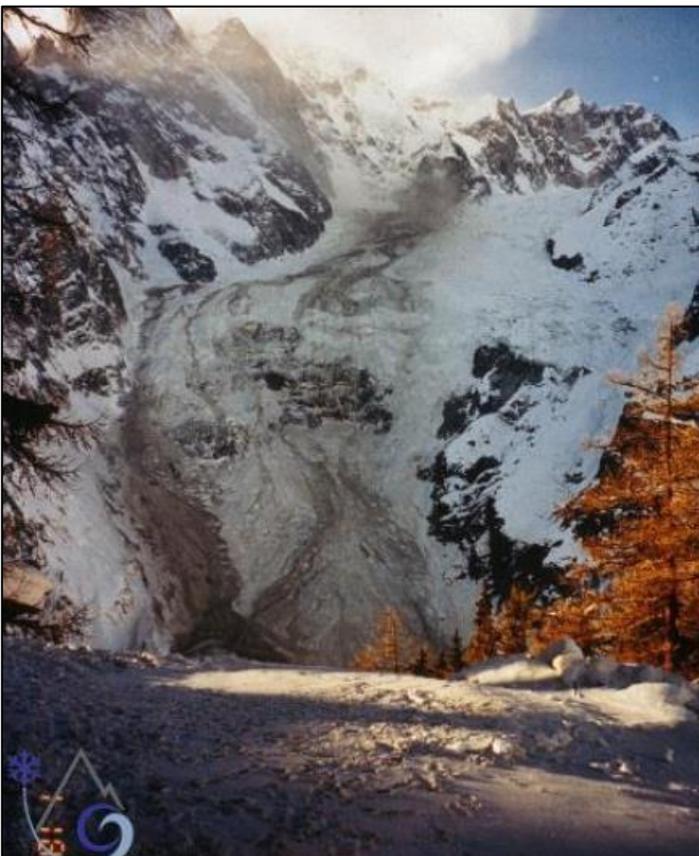


Figura 105: Vista generale del percorso valanghivo (Catasto regionale valanghe SCT).

7.14. Osservazioni

Dalle informazioni ottenute dal catasto valanghe della Valle d'Aosta si può osservare che la maggior parte dei danni si siano verificati in seguito ad eventi valanghivo sufficientemente grossi da arrivare ad interessare i fondivalle. A venire danneggiati dalle valanghe sono stati sia i tralicci, principalmente di tipo tronco-piramidale, sia i pali di sostegno delle linee elettriche.

Si osserva come il maggior numero di strutture di sostegno danneggiate, di cui si abbia documentazione, siano di tipo a traliccio; ciò potrebbe essere dovuto sia a un loro maggiore utilizzo nelle zone a rischio caduta valanghe rispetto alle strutture di sostegno a palo sia a causa di una possibile minore resistenza dei tralicci rispetto ai pali alle azioni esercitate dalle valanghe. L'ultima ipotesi dovrebbe essere verificata tramite misurazioni; tuttavia, è da considerare che i tralicci di piccole dimensioni, che è la tipologia maggiormente diffusa tra le strutture a traliccio che hanno subito danni, si comportano come ostacoli stretti a faccia piena e quindi presentano un'estensione dell'area della faccia su cui impatta la valanga molto maggiore rispetto ai pali; quindi, le valanghe dovrebbero esercitare una forza maggiore sui tralicci rispetto ai pali.

È importante notare che quasi tutti i tralicci e i pali danneggiati si trovavano nella zona di accumulo della valanga in cui essa diminuisce la sua energia. Il fatto che le infrastrutture danneggiate si trovassero nella zona di accumulo fa supporre che probabilmente fossero state collocate in quelle posizioni perché si è fatto riferimento a eventi valanghivi di minore dimensione aventi una distanza di arresto inferiore. È quindi necessario valutare la rarità degli eventi aventi dimensioni tali da arrivare a danneggiare le infrastrutture energetiche per consentire una corretta valutazione della necessità o meno di ricollocare le strutture o aumentarne la resistenza alle pressioni esercitate dalle valanghe.

8. Vulnerabilità dei pali a sezione circolare soggetti a valanga di tipo radente: creazione di curve di fragilità

Una volta riportate sia le caratteristiche delle valanghe di neve sia le caratteristiche delle strutture di sostegno delle linee elettriche aeree e aver osservato quali siano i danni che le valanghe causano alle infrastrutture energetiche nei capitoli precedenti, si è calcolata la vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo, di cui verrà riportato in questo capitolo il procedimento e i risultati ottenuti.

La vulnerabilità può essere definita come il grado di perdita atteso seguente all'impatto di un elemento a rischio oppure come propensione degli elementi esposti a subire danni e perdite quando vengono interessati da un evento. In particolare, per quanto riguarda il caso in studio, per poter determinare la vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo, le quali costituiscono l'elemento a rischio, si andrà a determinare quanti dei pali considerati, di cui si riporteranno in seguito le caratteristiche, resistano e quanti invece vengano danneggiati dalla valanga considerata, la quale corrisponde all'evento impattante l'elemento a rischio.

Per ogni combinazione di elemento a rischio e intensità dell'evento si ottiene una differente vulnerabilità, mettendo assieme tutti i valori di vulnerabilità ottenuti si possono realizzare le curve di fragilità o curve di vulnerabilità dell'elemento a rischio considerato. Le curve di vulnerabilità sono funzioni che mostrano la relazione tra l'intensità del processo e il grado di perdita degli elementi a rischio, normalmente si ottiene un grafico avente sulle ascisse la variazione d'intensità dell'evento e sulle ordinate la vulnerabilità dell'elemento a rischio per una data intensità dell'evento.

Nel presente studio l'intensità dell'evento impattante l'elemento a rischio, ossia l'evento valanghivo, non può essere descritto da una sola variabile ma da due, ossia la pressione d'impatto e l'altezza di flusso della valanga, perché sono determinanti entrambe per l'identificazione dell'intensità dell'evento per il calcolo delle forze agenti sui pali, ossia gli elementi a rischio. Di conseguenza non si otterrà un'unica curva di fragilità: dovendo considerare due variabili per la determinazione dell'intensità dell'evento si riporteranno sulle ascisse la pressione d'impatto della valanga, sulle ordinate la vulnerabilità dell'elemento a rischio e si realizzerà una differente curva per ogni altezza di flusso valanghivo considerata.

Oltre alle curve di vulnerabilità si realizzeranno anche grafici a variazione cromatica, i quali mostreranno, come fanno anche le curve di fragilità, come varia la vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo considerate al variare dell'intensità dell'evento valanghivo, ossia al variare della pressione d'impatto e dell'altezza di flusso della valanga. I grafici a variazione cromatica riportano sulle ascisse e sulle ordinate le variabili identificanti l'intensità dell'evento, in particolare sulle ascisse l'altezza del flusso e sulle ordinate la pressione d'impatto, mentre indicano il valore della vulnerabilità dell'elemento a rischio tramite una variazione di colore che corrisponde al range di valori della vulnerabilità che va da zero a uno.

Nella seguente analisi si è considerato il caso di una valanga radente di neve umida e per questo si è considerato un range di pressione d'impatto compreso tra 10 e 150 kPa e un range di altezze di flusso valanghivo compreso tra 0.5 e 5 m.

Nel presente studio si è preso in considerazione sia il caso di palo in acciaio sia di palo in legno di castagno dato che sono entrambe le tipologie presenti sul territorio, i primi sono la tipologia tutt'ora impiegata mentre i secondi sono presenti solo dove non è stata rinnovata l'infrastruttura.

Di seguito si riporteranno le caratteristiche delle strutture di sostegno a palo considerate e le forze che la valanga esercita sulle strutture stesse, successivamente si analizzeranno, prima per il palo in acciaio nel Capitolo 8.1 e poi per il palo in legno nel Capitolo 8.2, le resistenze e le vulnerabilità delle strutture; infine, si effettueranno nel Capitolo 8.3 considerazioni sui risultati ottenuti.

I pali in acciaio che sono stati presi in considerazione sono solo una parte delle tipologie di palo per linee elettriche aeree che offre il mercato come si può vedere nel Capitolo 6; perciò, nell'utilizzo dei risultati ottenuti in quest'analisi sarà necessario tener conto delle reali dimensioni dell'infrastruttura considerata e se necessario ripeterne in procedimento inserendo le caratteristiche della struttura di cui si vuole determinare la vulnerabilità. Inoltre, in quest'analisi si assumerà, come approssimazione, che i pali siano di forma cilindrica con diametro costante per l'intera loro lunghezza. Quest'approssimazione non impedisce di valutare la vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo alle valanghe radenti di neve umida, ma sarebbe necessario tenerne conto se si volesse valutare la resistenza esatta, in caso di impatto di una valanga, di una struttura reale presente sul territorio o che si volesse installare.

A parità di pressione di impatto e altezza del flusso per il caso del palo in acciaio si sono valutati 275 differenti casi in cui si sono variate:

- La densità del flusso valanghivo: 200, 250, 300, 350 e 400 kg/m³.
- Il diametro del palo: 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23, 0.25, 0.27, 0.29, 0.31, 0.33 e 0.35 m.
- Lo spessore del palo: 5, 7.5, 10, 12.5 e 15 mm.

A parità di pressione di impatto e altezza del flusso per il caso del palo in legno di castagno, essendo a sezione piena, si è valutato un numero inferiore dicasi: 80 casi in cui si sono variate:

- La densità del flusso valanghivo: 200, 250, 300, 350 e 400 kg/m³.
- Il diametro del palo: 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29, 0.30 m.

Per entrambe le tipologie di strutture, assimilate a ostacoli stretti a sezione circolare, si è iniziato lo studio determinando prima il momento e il taglio massimi che la valanga esercita sui pali, e in un secondo momento si sono calcolati momento e taglio resistenti dei pali, si sono infine confrontate le azioni agenti con quelle resistenti potendo così determinare se il palo in studio è in grado o meno di resistere all'azione esercitata dalla valanga.

Essendo le strutture considerate nell'analisi dei pali di forma circolare si potrà non considerare la direzione della valanga rispetto all'orientazione del palo in quanto la forma circolare fa sì che le azioni esercitate dalla valanga non dipendano dall'orientazione della struttura.

Per determinare le forze agenti sui pali si è iniziato calcolando l'altezza di risalita della valanga sul palo, indicata in Figura 107, e la velocità del flusso utilizzando le formule suggerite da Rudolf-Miklau & Sauermoser & Mears (2015) riportate nel Capitolo 4.2.

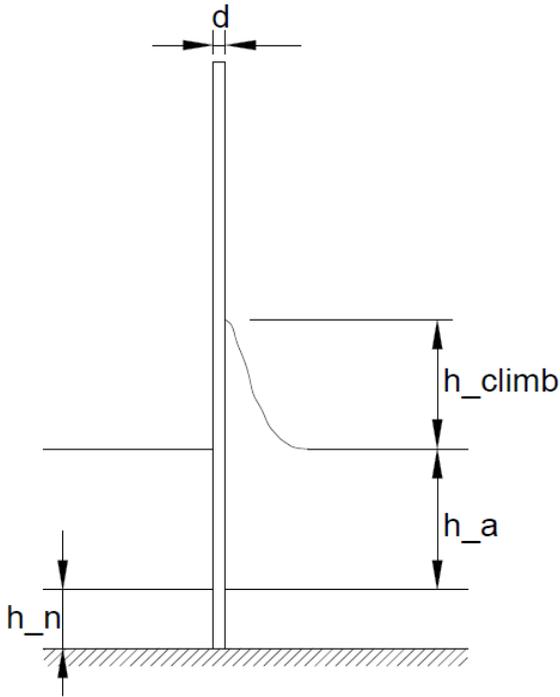


Figura 107: h_a è l'altezza del flusso della valanga, h_n è l'altezza del manto nevoso, h_{climb} è l'altezza di risalita della valanga sul palo e d è il diametro del palo.

Si è ricavata la velocità del flusso ribaltando la formula per la determinazione della pressione d'impatto:

$$v_f = \sqrt{\frac{2p_{imp}}{c_d \cdot \rho_f}} \quad [m/s]$$

Si sono ottenute 75 differenti velocità, ognuna per ogni combinazione di pressione d'impatto (p_{imp}), per la quale sono stati presi 15 valori tra 10 e 150 kPa, e densità del flusso (ρ_f), per cui sono stati considerati cinque valori tra 200 e 400 kg/m³.

Essendo il palo un ostacolo stretto di sezione circolare ed essendo la valanga considerata costituita da neve umida si è scelto un coefficiente di resistenza aerodinamica ' c_d ' pari a 4 essendo esso un valore intermedio nel range dei valori suggeriti nella Tabella 5.

Considerando le larghezze (b) degli ostacoli considerati, 16 per il palo in acciaio e 11 per il palo in legno, e i differenti spessori del flusso (d_f), 10 differenti spessori da 0.5 a 5 m, è stato calcolato il fattore di riduzione $f_{b/af}$ dipendente dai precedenti due parametri e riportato in Tabella 6.

Dopo aver calcolato la velocità e il fattore di riduzione $f_{b/af}$, si è potuta calcolare l'altezza di risalita della valanga lungo il palo assumendo il fattore di perdita di quantità di moto (λ) pari a 2.5, ossia un valore compreso tra 2 e 3 il quale è il range consigliato nel caso di valanghe di neve umida.

$$h_{dyn} = \frac{v_f^2}{2g\lambda} \cdot f_{b/af} \quad [m]$$

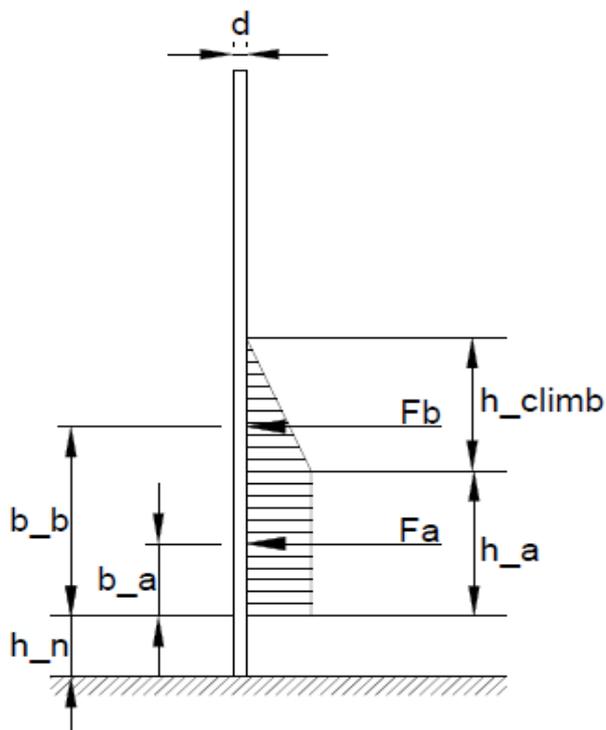


Figura 108: F_b e F_a sono le forze di impatto della valanga sul palo, b_a e b_b sono i rispettivi bracci delle due forze.

Come mostrato in Figura 108, si è considerato che la valanga eserciti una pressione di intensità costante nel tratto del palo in corrispondenza del flusso valanghivo e una pressione di impatto, andando verso l'alto, decrescente lineare per il tratto di palo in cui la valanga risale lungo il palo stesso.

Si calcolano le forze esercitate sui pali dalla valanga moltiplicando la pressione di impatto (p_{imp}) per l'area del palo impattata dalla valanga stessa:

$$F_a = p_{imp} \cdot h_a \cdot d; \quad F_b = \frac{p_{imp} \cdot h_{climb} \cdot d}{2}$$

Il taglio massimo esercitato dalla valanga è dato dalla somma di F_a e F_b ossia delle forze massime esercitate dalla valanga la prima sul tratto di palo di altezza pari del flusso valanghivo e la seconda esercitata nel tratto di palo corrispondente all'altezza di risalita del flusso:

$$T_{max} = F_a + F_b = T_{Sd} \quad [N]$$

Il momento massimo agente sul palo è invece dato dalla moltiplicazione delle forze F_a e F_b per i rispettivi bracci b_a e b_b considerando come punto di rotazione il punto a distanza h_n dal suolo, essendo h_n l'altezza del manto nevoso:

$$M_{max} = (F_a \cdot b_a) + (F_b \cdot b_b) = M_{Sd} \quad [Nm]$$

Nei casi studiati si è considerato che non vi fosse neve al suolo e che quindi l'altezza del manto nevoso fosse pari a '0'.

La vulnerabilità è funzione delle caratteristiche dell'elemento a rischio, che nel caso in studio sono il palo in acciaio e in legno, e dell'intensità del fenomeno, che in questo caso è determinata dalla pressione d'impatto e dall'altezza del flusso della valanga. Assumendo valori compresi tra 0 e 1 la vulnerabilità va a indicare la percentuale di perdita per un dato evento nel gruppo di elementi a rischio considerati nell'analisi, che in questo caso sono 275 per il palo in acciaio e 80 per il palo in legno.

Di seguito, dopo il calcolo delle resistenze degli elementi a rischio considerati, verranno riportate le curve di vulnerabilità o curve di fragilità per il palo in acciaio e per il palo in legno. Le curve di vulnerabilità sono funzioni che utilizzano dati empirici per mostrare la relazione tra l'intensità del processo, definita dalla pressione d'impatto e dall'altezza del flusso valanghivo, e il grado di perdita risultante per ogni elemento a rischio, ossia i pali.

Il grado di perdita degli elementi esposti, i pali, nell'analisi è dato dalla percentuale di elementi non in grado di resistere al momento e/o al taglio agente sugli stessi per effetto della valanga sul numero totale di elementi considerati.

8.1. Palo in acciaio

Nel caso del palo in acciaio la sezione è un cerchio avente diametro esterno 'd' e spessore 't'; perciò, l'area (A) della sezione e il momento d'inerzia (I) si sono calcolati utilizzando le seguenti formule:

$$A = \pi * \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} - t \right)^2 \right] \quad [m^2]$$

$$I = \frac{\pi}{4} * \left[\left(\frac{d}{2} \right)^4 - \left(\frac{d}{2} - t \right)^4 \right] \quad [m^4]$$

Considerando la tensione di snervamento dell'acciaio 'f_y' pari a 235 Mpa e il coefficiente di sicurezza 'γ_M' pari a 1.05 si è potuto calcolare il momento resistente massimo:

$$M_{Rd} = \frac{f_y}{10^6} * \frac{I}{(d/2)\gamma_M} \quad [Nm]$$

Per il calcolo del taglio resistente si è dovuto tenere conto che, essendo la sezione del palo un cerchio cavo, la sezione resistente al taglio è pari alla metà dell'area 'A' della sezione del palo stesso:

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{10^6} * \frac{A/2}{\gamma_M} \quad [Nm]$$

Successivamente si sono confrontate le azioni resistenti con le azioni agenti per tutte le 275 casistiche considerate a parità di pressione di impatto e altezza del flusso valanghivo.

Il palo resiste all'impatto della valanga se sono verificate entrambe le condizioni seguenti, ossia se il momento massimo resistente (M_{Rd}) e il taglio massimo resistente (T_{Rd}) sono maggiori rispettivamente del momento agente (M_{Sd}) e del taglio agente (T_{Sd}).

$$M_{Rd} > M_{Sd}$$

$$T_{Rd} > T_{Sd}$$

Infine, per ogni combinazione di pressione di impatto e altezza del flusso valanghivo si è calcolata la probabilità di rottura (p_f) del palo. Si è calcolata la probabilità di rottura come numero di casi in cui almeno una delle due condizioni precedenti non viene rispettata su 275 che è il numero di casi considerati a parità di pressione d'impatto e flusso valanghivo:

$$p_f = \frac{n^\circ failure}{275}$$

In Tabella 9 sono stati riportati i valori di probabilità di rottura, ossia di vulnerabilità del palo in acciaio, ottenuti per ogni livello d'intensità di evento valanghivo considerato, ossia per ogni combinazione di pressione d'impatto e altezza del flusso considerate. Nella tabella si può leggere la variazione della vulnerabilità al variare della pressione d'impatto lungo le colonne per fissata altezza del flusso e si può leggere la variazione della vulnerabilità al variare dell'altezza del flusso per fissata pressione d'impatto lungo le righe.

Tabella 9

Probabilità di rottura											
		h_a [m]									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
p_{imp} [kPa]	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0182
	20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0182	0.0545	0.1273	0.2545
	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0364	0.0909	0.2182	0.4182	0.5273
	40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0182	0.0909	0.2364	0.4364	0.6182	0.7636
	50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0545	0.2000	0.4182	0.6000	0.7636	0.8909
	60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0182	0.1091	0.2909	0.5273	0.7273	0.8909	0.9636
	70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0364	0.1818	0.4364	0.6727	0.8545	0.9636	1.0000
	80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0545	0.2545	0.5273	0.7455	0.9091	1.0000	1.0000
	90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0909	0.3455	0.6182	0.8182	0.9636	1.0000	1.0000
	100	0.0000	0.0000	0.0000	0.1273	0.4182	0.6909	0.8909	0.9818	1.0000	1.0000
	110	0.0000	0.0000	0.0182	0.2000	0.4909	0.7636	0.9273	1.0000	1.0000	1.0000
	120	0.0000	0.0000	0.0364	0.2182	0.5455	0.8000	0.9636	1.0000	1.0000	1.0000
	130	0.0000	0.0000	0.0364	0.2909	0.6182	0.8545	0.9818	1.0000	1.0000	1.0000
	140	0.0000	0.0000	0.0545	0.3455	0.6909	0.8909	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	150	0.0000	0.0000	0.0909	0.4182	0.7273	0.9273	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
μ		0.0000	0.0000	0.0158	0.1200	0.2970	0.4752	0.6194	0.7164	0.7855	0.8279
σ		0.0000	0.0000	0.0264	0.1365	0.2597	0.3349	0.3639	0.3542	0.3291	0.3020

Si sono calcolate la media e la deviazione standard della probabilità di rottura dei valori riportati in colonna, si è quindi calcolato il valor medio e la variazione della vulnerabilità al variare della pressione d'impatto per fissata altezza del flusso.

In Tabella 9 si può osservare che si ha la deviazione standard maggiore per h_a pari a 3.5 m avendo un andamento crescente al crescere dell'altezza di flusso fino al picco per poi decrescere all'aumentare dell'altezza del flusso.

Normalmente si ha un'unica curva di vulnerabilità, come nel campo dell'idraulica, che riporta sulle ascisse l'intensità dell'evento, per esempio la portata di un corso d'acqua, e sulle ordinate il grado di perdita per quel dato evento, ossia la vulnerabilità. Nel caso dei fenomeni valanghivi l'intensità dell'evento non viene definita da una sola variabile ma da due. Per oltrepassare il problema della doppia variabile da considerare per l'identificazione della magnitudo dell'evento considerato si sono riportate sulle ordinate la vulnerabilità come in campo idraulico, che in questo caso corrisponde alla probabilità di rottura dei pali, sull'ascissa si è riportata la pressione d'impatto esercitata sulla valanga e poi sono state tracciate dieci curve di vulnerabilità, ognuna per ogni altezza del flusso valanghivo considerato.

Nel caso delle valanghe non si è potuta considerare una sola variabile rappresentante l'intensità dell'evento perché la pressione d'impatto della valanga e l'altezza del flusso non sono dipendenti le une dalle altre; infatti, la pressione d'impatto dipende dalla velocità e dalla densità della valanga, non dall'altezza del flusso. Le caratteristiche intrinseche del palo che influenzano il grado di vulnerabilità dello stesso vengono considerate nel calcolo stesso della probabilità di rottura.

I dati riportati nel Grafico 1 sono gli stessi valori indicati nella Tabella 9, ma tramite le curve di fragilità si riesce ad avere una visione più chiara di come varia la vulnerabilità rispetto alla pressione d'impatto e rispetto all'altezza del flusso. Essendo stati calcolati la media e la deviazione standard per la probabilità di rottura fissando l'altezza del flusso essi sono anche la media e la deviazione standard delle curve di fragilità riportate nel grafico; infatti, ognuna di esse rappresenta la vulnerabilità al variare della pressione d'impatto per una fissata altezza di flusso.

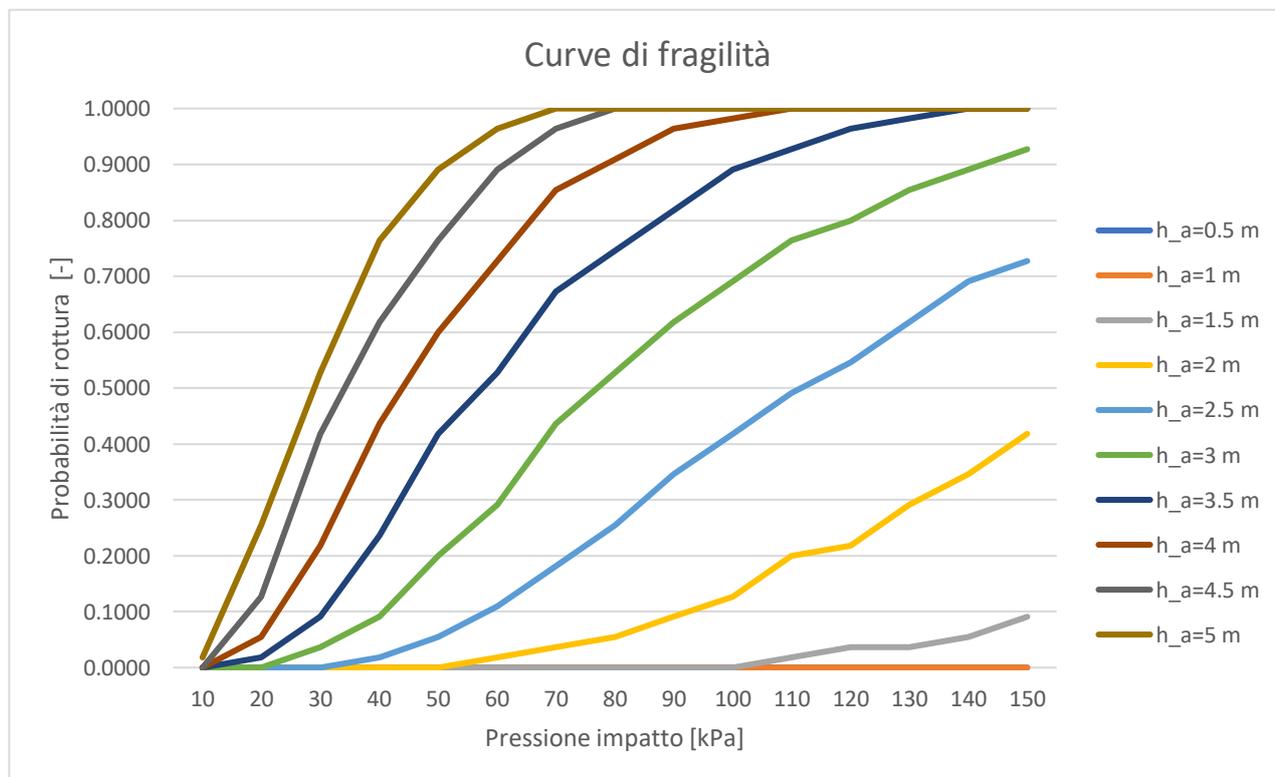


Grafico 1

Un altro modo che si è scelto di utilizzare per rappresentare la variazione della vulnerabilità al variare dell'intensità dell'evento è un grafico a variazione cromatica (Grafico 2). In questo grafico è stata riportata sull'ascissa l'altezza del flusso, sull'ordinata la pressione d'impatto e tramite una scala di colori viene indicato il valore di vulnerabilità in cui il blu indica che la probabilità di rottura del palo è zero e il giallo indica che la probabilità di rottura è 1.

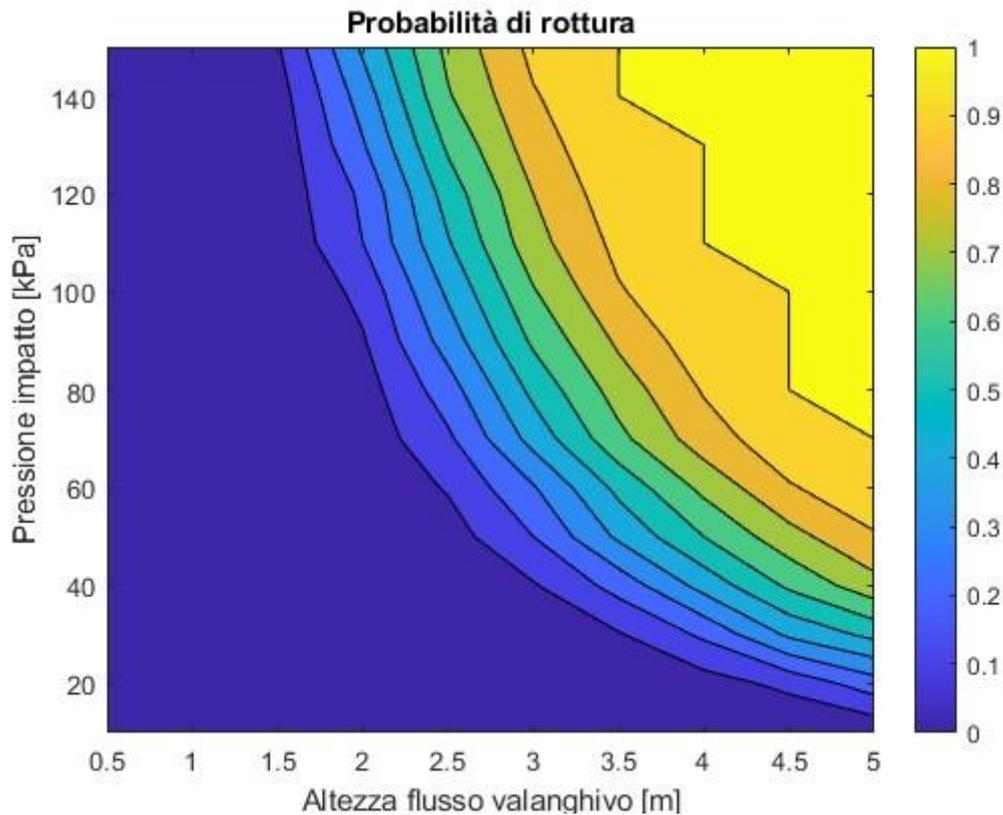


Grafico 2

Dai risultati ottenuti in Tabella 9 e successivamente nel Grafico 1 e nel Grafico 2 si osserva che, per il range di pressioni d'impatto considerate, non esistono casi di rottura del palo per flusso valanghivo di spessore pari a 0.5 e 1.0 m, ossia si ha vulnerabilità pari a zero per questi due valori di altezza del flusso.

8.2. Palo in legno di castagno

Nel caso del palo in legno di castagno la sezione è un cerchio pieno avente diametro esterno 'd'; perciò, l'area (A) della sezione e il momento d'inerzia (I) si sono calcolati utilizzando le seguenti formule:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad [m^2]$$

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot d^4 \quad [m^4]$$

I pali sono costituiti da legno massiccio aventi le fibre del legno posizionate nella direzione longitudinale del palo, trattandosi di legno di castagno ed avendo le caratteristiche appena riportate il palo in legno di castagno appartiene alla classe di resistenza D30.

Dalla norma UNI EN 338-2016 si sono ricavate la resistenza caratteristica a flessione ($f_{m,k}$) e la resistenza caratteristica a taglio ($f_{v,k}$):

$$f_{m,k} = 30.00 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,k} = 3.90 \text{ N/mm}^2$$

Per passare dalle resistenze caratteristiche (f_k) alle resistenze di progetto (f_d) si è utilizzata la seguente formula riportata nel NTC2018:

$$f_d = \frac{k_{mod} \cdot f_k}{\gamma_M}$$

In cui k_{mod} è un coefficiente correttivo che tiene conto dell'effetto della durata del carico e γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza del materiale. Essendo il palo costituito da legno massiccio γ_M sarà pari a 1.50, mentre k_{mod} sarà pari a 1.10 perché l'impatto di una valanga su una struttura può essere assimilata a un carico istantaneo.

Si è quindi potuto calcolare il momento resistente (M_{Rd}) con la seguente formula:

$$M_{Rd} = \frac{f_y}{10^6} \cdot \frac{I}{(d/2)\gamma_M} \quad [Nm]$$

Per il calcolo del taglio resistente (T_{Rd}), essendo la sezione del palo un cerchio pieno, si deve considerare una sezione resistente al taglio pari a 3/4 dell'area (A) della sezione del palo stesso:

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{10^6} \cdot \frac{A(3/4)}{\gamma_M} \quad [Nm]$$

Si sono confrontate le azioni resistenti con le azioni agenti per tutte le 80 casistiche considerate a parità di pressione di impatto e altezza del flusso valanghivo. Il palo resiste all'impatto della valanga se sono verificate entrambe le condizioni seguenti, ossia se il momento massimo resistente (M_{Rd}) e il taglio massimo resistente (T_{Rd}) sono maggiori rispettivamente del momento agente (M_{Sd}) e del taglio agente (T_{Sd}).

$$M_{Rd} > M_{Sd}$$

$$T_{Rd} > T_{Sd}$$

Infine, per ogni combinazione di pressione di impatto e altezza del flusso valanghivo si è calcolata la probabilità di rottura (p_f) del palo.

Si è calcolata la probabilità di rottura come numero di casi in cui almeno una delle due condizioni precedenti non viene rispettata su 80 che è il numero di casi considerati a parità di pressione d'impatto e flusso valanghivo:

$$p_f = \frac{n^\circ failure}{80}$$

In Tabella 10 sono stati riportati i valori di probabilità di rottura, ossia di vulnerabilità del palo in legno di castagno, ottenuti per ogni livello d'intensità di evento valanghivo considerato, ossia per ogni combinazione di pressione d'impatto e altezza del flusso considerate. Nella tabella si può leggere la variazione della vulnerabilità al variare della pressione d'impatto lungo le colonne per fissata altezza del flusso e si può leggere la variazione della vulnerabilità al variare dell'altezza del flusso per fissata pressione d'impatto lungo le righe.

Tabella 10

Probabilità di rottura											
		h_a [m]									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
p_{imp} [kPa]	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250	0.3125	0.4375	0.6250
	20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1875	0.3750	0.5625	0.8125	1.0000	1.0000
	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250	0.4375	0.6875	0.9375	1.0000	1.0000	1.0000
	40	0.0000	0.0000	0.0000	0.3125	0.6250	0.9375	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	50	0.0000	0.0000	0.1250	0.4375	0.8125	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	60	0.0000	0.0000	0.1875	0.5625	0.9375	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	70	0.0000	0.0000	0.3125	0.6875	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	80	0.0000	0.0000	0.3750	0.8125	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	90	0.0000	0.0000	0.5000	0.9375	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	100	0.0000	0.0625	0.5625	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	110	0.0000	0.1250	0.6250	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	120	0.0000	0.1875	0.6875	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	130	0.0000	0.1875	0.7500	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	140	0.0000	0.2500	0.8125	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	150	0.0000	0.3125	0.8750	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
μ		0.0000	0.0750	0.3875	0.6583	0.8000	0.8667	0.9083	0.9417	0.9625	0.9750
σ		0.0000	0.1051	0.3114	0.3770	0.3221	0.2858	0.2359	0.1745	0.1403	0.0935

Si sono calcolate la media e la deviazione standard della probabilità di rottura dei valori riportati in colonna, si è quindi calcolato il valor medio e la variazione della vulnerabilità al variare della pressione d’impatto per fissata altezza del flusso.

Nella Tabella 10 precedente si può osservare che si ha la deviazione standard maggiore per h_a pari a 2.0 m avendo un andamento crescente al crescere dell’altezza di flusso fino al picco per poi decrescere all’aumentare dell’altezza del flusso.

Come per il caso del palo in acciaio, i valori tabellari della vulnerabilità del palo in legno sono stati riportati nel Grafico 4 sotto forma di curve di vulnerabilità o curve di fragilità.

Nel Grafico 4 vengono riportate sulle ascisse le pressioni d’impatto e sulle ordinate la probabilità di rottura o grado di vulnerabilità; per tener conto che sono due le variabili che identificano l’intensità dell’evento valanghivo, l’altezza del flusso e la pressione d’impatto, sono state tracciate dieci curve di vulnerabilità, una per ogni altezza di flusso considerata.

Ogni curva di vulnerabilità permette di visualizzare come varia la vulnerabilità al variare della pressione d’impatto e, fissando la pressione d’impatto, si può osservare come varia la vulnerabilità fra una curva e l’altra, ossia al variare dell’altezza del flusso.

Essendo stati calcolati la media e la deviazione standard della vulnerabilità fissando l’altezza del flusso essi sono anche la media e la deviazione standard delle curve di fragilità riportate nel grafico; infatti, ognuna di esse rappresenta la vulnerabilità al variare della pressione d’impatto per una fissata altezza di flusso.

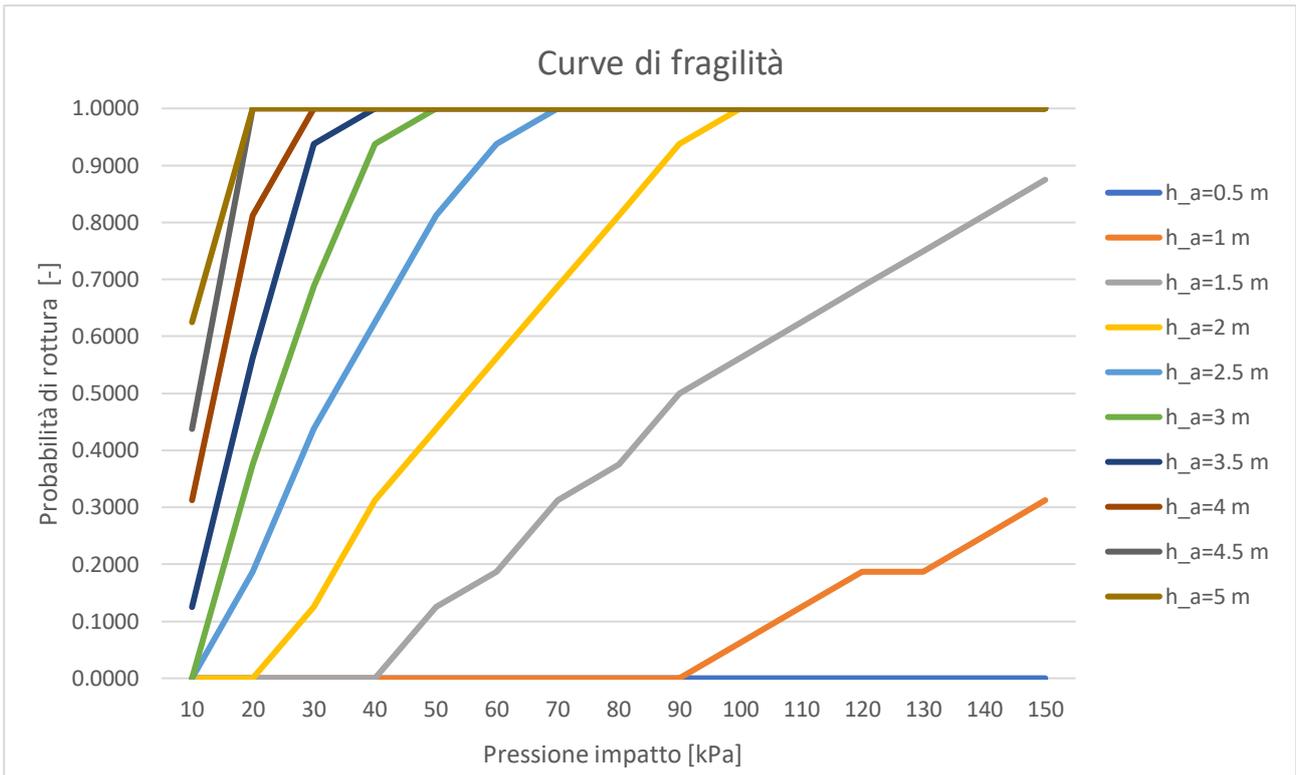


Grafico 3

Si è scelto di utilizzare anche un grafico a variazione cromatica per rappresentare la variazione della vulnerabilità al variare dell'intensità dell'evento (Grafico 3). In questo grafico è stata riportata sull'ascissa l'altezza del flusso, sull'ordinata la pressione d'impatto e tramite una scala a variazione cromatica si è rappresentato il valore di vulnerabilità in cui il blu indica che la probabilità di rottura del palo è zero e il giallo indica che la probabilità di rottura è 1.

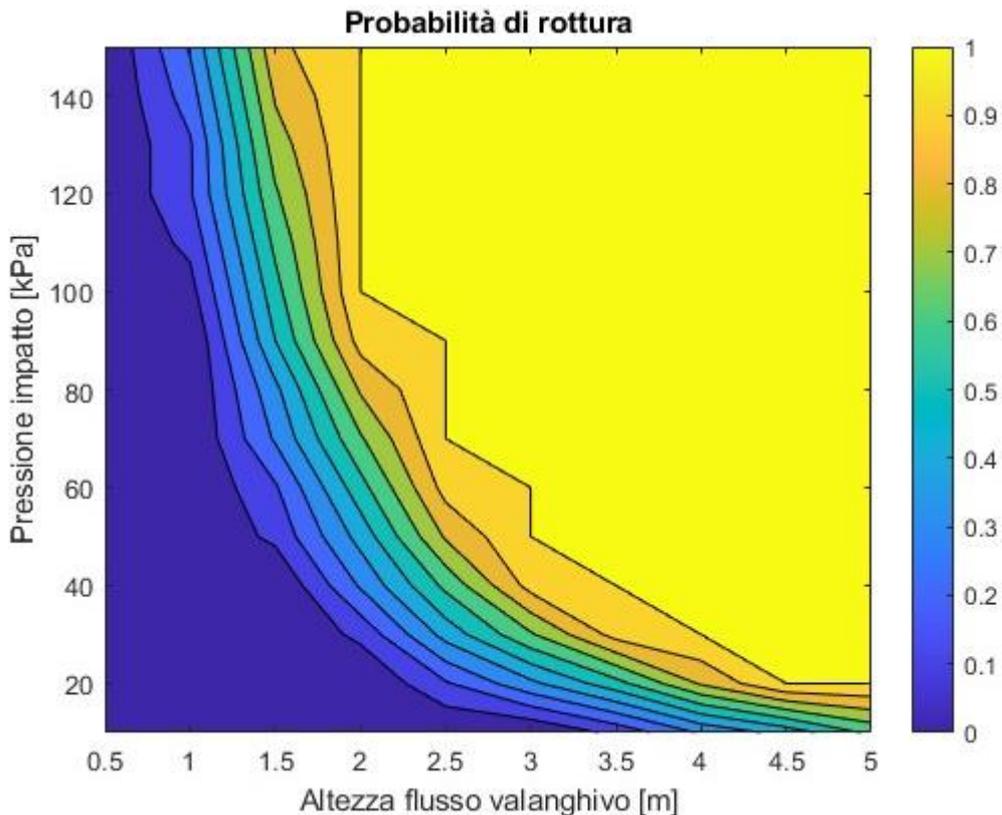


Grafico 4

Dai risultati ottenuti in Tabella 10 e successivamente nel Grafico 4 e nel Grafico 3 si osserva che, per il range di pressioni d'impatto considerate, non esistono casi di rottura del palo per flusso valanghivo di spessore pari a 0.5 m, ossia si ha vulnerabilità è pari a zero per questo valore di altezza del flusso.

8.3. Osservazioni

Dalla visualizzazione dei risultati ottenuti nel Grafico 1 e nel Grafico 2 per il palo in acciaio e nel Grafico 4 e nel Grafico 3 per il palo in legno di castagno si osserva come la probabilità di rottura e quindi la vulnerabilità aumenti al crescere della pressione d'impatto e dell'altezza del flusso valanghivo.

A parità di pressione d'impatto e altezza del flusso valanghivo si osserva come la probabilità di rottura dei pali in legno di castagno sia molto maggiore dei pali in acciaio a causa della differente resistenza caratteristica del materiale che li compongono; infatti, per il palo in legno di castagno, si può osservare che le curve di fragilità nel Grafico 3 sono più schiacciate verso valori bassi di pressione d'impatto rispetto al Grafico 1 e nel Grafico 4. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** a variazione cromatica vi è un'area di colore giallo, indicante il massimo grado di vulnerabilità possibile, molto più estesa rispetto al Grafico 2 per il palo in acciaio.

Tenendo conto che raramente le valanghe radenti hanno spessori di flusso di 4-5 m la valanga deve esercitare pressioni elevate, e quindi a parità di densità del flusso velocità più elevate, affinché un palo in acciaio non resista alle sollecitazioni a cui viene sottoposto durante un evento valanghivo; al contrario, nel caso di un palo in legno, si hanno probabilità di rottura maggiori a parità delle altre condizioni anche per spessori del flusso minori.

Per entrambe le tipologie di palo si è ottenuta probabilità di rottura pari a zero nel caso di spessore del flusso valanghivo di 0.5 m per il range di pressioni d'impatto considerate, come è ben visibile in Tabella 9 e in Tabella 10; tuttavia, questa condizione cambierebbe se si estendesse il range di pressioni considerato.

Il range di densità del flusso utilizzato corrisponde ai valori medi per valanghe radenti di neve umida, mentre il range di pressione d'impatto utilizzato non permette, per i valori di densità maggiori utilizzati, di raggiungere le velocità massime possibili per questo tipo di evento valanghivo. Si deve quindi supporre che vi sia la possibilità che valanghe radenti di neve umida possano essere in grado di esercitare pressioni d'impatto anche maggiori dei valori considerati in quest'analisi con conseguente aumento della probabilità di rottura per entrambe le tipologie di palo considerate.

In quest'analisi si è calcolata la sola vulnerabilità dei pali, ma si potrebbe ampliare l'analisi andando a determinare il rischio di rottura dei pali prendendo in considerazione eventi specifici. La necessità della scelta di un evento valanghivo specifico per poter passare dalla vulnerabilità al rischio è dettata dalla necessità di conoscere il tempo di ritorno di un dato evento e la sua collocazione rispetto all'elemento a rischio considerato.

Per passare dalla curva di vulnerabilità a una curva del rischio sarebbe necessario moltiplicare i valori della vulnerabilità per il valore degli elementi esposti e per la probabilità d'impatto, quest'ultima è data dalla pericolosità dell'evento per l'esposizione dell'elemento a rischio.

Lo studio della vulnerabilità permette di comprendere a quali tipi di evento l'elemento a rischio è in grado di resistere senza che venga danneggiato, ma è necessario in un secondo momento passare a una valutazione del rischio per poter determinare se è effettivamente necessario effettuare degli interventi di riduzione del rischio o se non lo è. Se la probabilità che si verifichi un evento sufficientemente intenso da danneggiare l'elemento a rischio è molto bassa, il rischio di danneggiamento dell'elemento può essere ritenuto accettabile e in questo caso non verrebbe effettuato nessun intervento di mitigazione, al contrario, se il rischio non venisse ritenuto accettabile, si dovrebbe provvedere allo studio del miglior intervento di riduzione del rischio applicabile nel caso specifico.

9. Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi si è sviluppato a partire dalla caratterizzazione delle valanghe di neve e delle strutture di sostegno delle linee elettriche aeree per arrivare al calcolo delle curve di vulnerabilità delle strutture di sostegno a palo delle linee elettriche aeree colpite da una valanga radente di neve umida.

Dalla consultazione del catasto valanghe della regione Valle d'Aosta si è osservato come le valanghe abbiano causato nel corso dei decenni passati il danneggiamento di strutture di sostegno delle linee elettriche aeree sia di tipo a palo sia di tipo a traliccio. La maggior parte dei danni sono avvenuti nelle zone di accumulo di valanghe di grandi dimensioni che hanno raggiunto i fondivalle, probabilmente gli eventi che hanno causato danni avevano dimensione maggiori delle valanghe previste durante la progettazione delle infrastrutture energetiche.

Si è osservato anche che la tipologia di struttura di sostegno maggiormente danneggiata dalle valanghe è la tipologia a traliccio di piccole dimensioni; ciò potrebbe essere dovuto sia a un loro maggiore utilizzo nelle aree in cui si è indagato, ossia in Valle d'Aosta, sia a causa di una loro possibile minore resistenza alle azioni esercitate dalle valanghe rispetto ad altre tipologie di strutture di sostegno. I tralicci di piccole dimensioni si comportano, quando impattati da una valanga, come ostacoli stretti pieni e quindi presentano un'estensione dell'area della faccia su cui impatta la valanga molto maggiore rispetto alle strutture di sostegno a palo; dipendendo l'intensità delle forze esercitate da una valanga su un ostacolo dell'estensione dell'area dell'ostacolo direttamente colpita dalla valanga, le valanghe dovrebbero quindi esercitare una forza maggiore sui tralicci stretti rispetto ai pali aventi larghezza minore rispetto ai primi. Quest'ipotesi dovrebbe comunque essere confermata da misurazioni su ostacoli posizionati in siti valanghivi.

Tuttavia, anche le strutture di sostegno a palo si è osservato essere spesso danneggiate dalle valanghe; in particolare, nella tesi, si è andati a determinare la curva di vulnerabilità di questo tipo di strutture quando vengono impattate da una valanga radente di neve umida.

In questo studio i pali di sostegno erano quindi gli elementi a rischio, di cui si è voluto determinare la vulnerabilità, e la valanga radente di neve umida è l'evento impattante sull'elemento a rischio. Le curve di vulnerabilità permettono di visualizzare come varia la vulnerabilità dell'elemento a rischio al variare dell'intensità dell'evento, in questo caso è stato necessario utilizzare due variabili per la determinazione dell'intensità dell'evento: la pressione d'impatto e l'altezza del flusso valanghivo.

Esistono più tipologie di strutture di sostegno a palo per le linee elettriche aeree, nella presente tesi si sono voluti prendere in considerazione i pali di sostegno in acciaio attualmente utilizzati e i pali di sostegno in legno di castagno, i quali non vengono più installati ma sono ancora presenti sul territorio nelle infrastrutture energetiche più vecchie.

Essendo l'evento considerato una valanga radente di neve umida si è considerato un range di pressioni d'impatto costituito da 15 valori compresi tra 10 e 150 kPa e un range di altezza di flusso valanghivo costituito da dieci valori compresi tra 0.5 e 5 m.

La necessità dell'utilizzo di due variabili per la determinazione dell'intensità dell'evento valanghivo ha comportato la realizzazione dieci curve di fragilità, una per ogni altezza di flusso considerata, ognuna delle quali aveva sulle ascisse le pressioni d'impatto della valanga e sulle ordinate le vulnerabilità della struttura di sostegno a palo considerata. Si sono quindi ottenuti due differenti grafici, uno per ogni tipologia di palo considerato, riportanti le curve di fragilità: il Grafico 1 riporta le curve di fragilità dei pali di sostegno in acciaio e il Grafico 3 riporta le curve di fragilità delle strutture di sostegno in legno.

Dai valori di vulnerabilità ottenuti, riportati in Tabella 9 per il palo in acciaio e in Tabella 10 per il palo in legno, si può constatare il beneficio di passare dai pali in legno a quelli più moderni in acciaio, infatti si osserva come, a parità di pressione d’impatto e altezza del flusso valanghivo, i pali in legno hanno probabilità di rottura e quindi vulnerabilità nettamente superiore rispetto a quelli in acciaio. Si può infatti anche osservare nei grafici riportanti le curve di fragilità che nel Grafico 3, per i pali in legno, sono più schiacciate verso lavori bassi di pressione d’impatto rispetto al Grafico 1, per i pali in acciaio.

Sia dalle curve di vulnerabilità sia dai grafici a variazione cromatica si osserva come la probabilità di rottura, di entrambe le tipologie di palo, aumenti all’aumentare della pressione d’impatto e dell’altezza del flusso valanghivo.

Per entrambe le tipologie di pali di sostegno si sono ottenuti valori di vulnerabilità pari a zero per altezza di flusso pari a 0.5 m per l’intero range di pressioni d’impatto considerate, ossia tutti i pali sono in grado di resistere alle forze esercitate dalla valanga avente quella determinata intensità. Potendo le valanghe avere spessori del flusso anche superiori a 0.5 m risulta importante la determinazione dei percorsi valanghivi per posizionare al di fuori di essi le infrastrutture. Per i pali in acciaio, per i quali si è riscontrato che abbiano resistenza maggiore dei pali in legno, si è ottenuto vulnerabilità nulla anche per altezza di flusso pari a 1 m.

Molte delle infrastrutture danneggiate in Valle d’Aosta, in seguito a fenomeni valanghivi, sono state danneggiate nelle zone di accumulo delle valanghe e per questo si sottolinea l’importanza della valutazione delle distanze di arresto delle valanghe, a volte sottostimate in passato, per la scelta della collocazione delle infrastrutture.

Lo studio della vulnerabilità consente di comprendere a quali tipi di evento l’elemento a rischio è in grado di resistere senza che venga danneggiato; infatti, in quest’analisi, si è ottenuto che i pali di sostegno in legno possano essere danneggiati da valanghe redenti di neve umida aventi altezza di flusso superiore a 0.5 m, mentre i pali di sostegno in acciaio possono essere danneggiati da valanghe radenti di neve umida aventi altezza di flusso superiore a 1 m.

La vulnerabilità, calcolata in questa tesi, è inoltre il punto di partenza per la determinazione del rischio dell’elemento a rischio. La vulnerabilità consente di ottenere risultati validi in generale, mentre il rischio è specifico per un determinato elemento a rischio posizionato sul territorio, per passare quindi dalla vulnerabilità al rischio è necessario considerare un caso reale in cui si conoscono la posizione dell’elemento a rischio rispetto a un particolare evento valanghivo di cui sono note le caratteristiche.

10. Bibliografia e sitografia

- Frigo B. (2006). *Modelli meccanici per l'innescò e la propagazione delle valanghe di neve*. Tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria delle Strutture, Politecnico di Torino, Torino.
- Sovilla B., Faug T., Kohler A., Baroudi D., Fischer JT., Thibert E. (2016). Gravitational wet avalanche pressure on pylon-like structures. *Elsevier*, vol. 126 n. 66 – 75.
- Gorynina O., Bartelt P. (2023). Powder snow avalanche impact on hanging cables. *Elsevier*, vol. 173 n. 104422.
- Carpinteri A. (1992). *Scienza delle costruzioni 1*. Pitagora editrice, Bologna.
- Schaerer P., McClung D. (1996). *Manuale delle valanghe*. Zanichelli, Bologna.
- Bartelt P., Buser O., Christen M., Caviezel A. (2019). Dynamic magnification factors for snow avalanche impact (with pile-up) on walls and pylons. *7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, 24-26 June 2019*.
- Rudolf-Miklau F., Sauermoser S., Mears A. I. (2015). *The technical avalanche protection handbook*. Ernst & Sohn, Berlin.
- Hofer B., Schroll L., Illmer D. Everyday work of an avalanche engineer – Calculation of avalanche loads and protection of small objects in avalanche paths like ropeway towers. *International symposium on Mitigation Measures against Snow Avalanches and Other Rapid Gravity Mass Flows, Siglufjörður, Iceland, 3-5 Aprile 2019*.
- Lu M. L., Ph.D., Chakrabarti D. (2022). Designing Overhead Transmission Lines to Withstand Snow Avalanches. *Asce, Electrical Transmission and Substation Structures*.
- Art Mears, Chris Wilbur. (2008). A case study in avalanche risk tolerance in two transmission lines: 1) Colorado, USA and 2) Eastern Iceland. *International Snow Science Workshop, Whistler, 2008*.
- Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2018). *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)*. Roma.
- Keylock C. J., Barbolini M. (2001). *Snow avalanche impact pressure – vulnerability relations for use in risk assessment*.
- Papathoma-Köhle M., Keiler M., Totschnig R., Glade T. (2011). Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Springer*, vol. 64 pag. 2083 - 2105.
- Papathoma-Köhle M., Schlogl M., Dosser L., Roesch F., Borga M., Erlicher M., Keiler M., Fuchs S. (2022). Physical vulnerability to dynamic flooding: Vulnerability curves and vulnerability indices. *Elsevier*, vol. 607 n. 127501.
- Naaim-Bouvet F., Richard D. 2015. *Les risques naturels en montagne*. Quae, Versailles.

- Barbolini M. (a.a. 2004/2005). Corso neve e valanghe. *Modelli per il calcolo delle valanghe*. Università degli Studi di Pavia
- Corso di dinamica delle valanghe. (2002). AVAL-1D, Un programma di dinamica delle valanghe, Manuale di teoria per l'utilizzo pratico. *AINEVA, SLF, Bormio, 4-5 dicembre 2002*.
- Balduzzo M. (2011). *Applicazione della nuova norma CEI 11-4 alle linee di media tensione*. Tesi di laurea triennale in ingegneria energetica. Università degli studi di Padova, Padova.
- Benato R., Fellin L. (2011). *Impianti elettrici*. UTET scienze tecniche, Torino.
- Zonta C. (2012). *Confronti tra metodi di calcolo dell'impedenza alla sequenza omopolare di linee elettriche aeree*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria elettrica. Università degli studi di Padova, Padova.
- Sampl P., Granig M. (2009). Avalanche simulation with SAMOS-AT. *International Snow Science Workshop, Davos, 2009*.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. *Catasto Valanghe Regionale SCT*. Tratto da <https://catastovalanghe-lp.partout.it/>.
- Vigna B. (a.a. 2019/2020). *Slide del 'Corso di geologia e protezione civile'*. Politecnico di Torino, Torino.
- Margreth S., Stoffel L., Schaer M. (2016). *Prise en compte du danger d'avalanches et de la pression de la neige pour les installations à cables. Guide pratique. WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Davos, ISSN 2296-3456*.
- Caviezel A., Margreth S., Ivanova K., Sovilla B., Bartelt P. (2021). Power avalanche impact of tall vibrating structures. *8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural, Athens, Greece, 27—30 June 2021*.
- Venturato G. (2022). *Analisi di rischio valanghivo nel settore italiano del Monte Bianco (Val Ferret)*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria per l'ambiente e il territorio. Politecnico di Torino, Torino.
- Agostini F. (2022). *Analisi delle condizioni di innesco di valanghe in zona di foreste colpite dalla tempesta Vaia*. Tesi di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali. Università degli studi di Padova, Padova.