## POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

## Tesi di Laurea Magistrale

# Studio del comportamento meccanico della neve tramite un'apparecchiatura per prove di taglio diretto



#### Relatori

Prof.ssa Monica Barbero Prof. Mauro Borri Brunetto Prof. Fabrizio Barpi Prof. Valerio De Biagi Ing. Gianmarco Vallero

> **Candidato** Stefano Corrao

# Sommario

1	La n	neve come materiale10				
1.1 Introduzione				.10		
	1.2 Come nasce la neve?					
	1.3	Forr	nazione dei cristalli di neve	.11		
	1.4	II ca	mbiamento dopo la deposizione	.12		
	1.5	ll m	etamorfismo	.13		
	1.5.3	1	Generalità	.13		
	1.5.2	2	Tensione di vapore all'interno della neve	.14		
	1.5.3	3	Metamorfismo da equitemperatura	.14		
	1.5.4	4	Metamorfismo da gradiente termico	.15		
	1.5.	5	Metamorfismo da fusione e rigelo	.15		
	1.5.0	6	Metamorfismo meccanico	.16		
	1.6	La si	interizzazione della neve	.16		
	1.6.3	1	Generalità	.16		
	1.6.2	2	Il processo di sinterizzazione	.16		
1.7 Un pericolo della montagna: le valanghe		pericolo della montagna: le valanghe	.18			
	1.7.3	1	Generalità	.18		
	1.7.2	2	La stabilità del manto nevoso	.18		
	1.8	Stat	o dell'arte	.20		
	1.8.3	1	Generalità	.20		
	1.8.2	2	Prove di laboratorio	.20		
2	Арр	areco	chiatura di Taglio	.26		
	2.1	Intro	oduzione	.26		
2.2 Generalità		eralità	.26			
2.3 Componenti della apparecchiatura		nponenti della apparecchiatura	.27			
	2.4	Med	ccanica	.34		
2.5 Software di gestione			ware di gestione	.41		
	2.5.3	1	Interfaccia grafica	.42		
	2.5.2	2	Diagramma a blocchi	.43		
3	Calil	brazio	one dell'apparecchiatura e campagna di prove in Giappone	.46		
	3.1 Calibrazione delle guide scorrevoli					
3.2 Taratura pressione normale				.51		

	3.2.	3.2.1 Generalità		51	
	3.2.2 Procedu		Procedura operativa per la taratura dello sforzo normale	52	
	3.3 Test cor		condotti in Giappone	58	
	3.3.1 In		Interpretazione dei risultati	59	
	3.3.	2	Adesione malta-neve	63	
4	4 Prove		situ	65	
	4.1	Intro	oduzione	65	
	4.2	Org	anizzazione dell'uscita	65	
4.3 Analisi e interpretazione della struttura del manto nevoso		lisi e interpretazione della struttura del manto nevoso	67		
4.4 Analisi profilo stratigrafico		69			
	4.5	1.5 Esecuzione della prova			
4.6 Perché avviene il taglio? Uno sguardo a un modello FEM		73			
4.7 Interpretazione delle prove		77			
	4.7.1 Una possibile causa di rottura: mobilitazione della spinta passiva				
	4.8	Mig	liorie da apportare all'apparato di taglio	82	
5	Alle	Allegati			
6	Bibliografia131				

# Indice delle figure

Figura 1 Due diversi modi in cui avviene la formazione del cristallo di neve	12
Figura 2 Diverse tipologie di cristalli in relazione alla formazione	13
Figura 3 Metamorfismo di un cristallo di neve	14
Figura 4 Flusso di calore all'interno del manto nevoso	15
Figura 5 Trasferimento di massa per effetto di un gradiente nella tensione di vapore	17
Figura 6 Due diversi meccanismi di slavina: valanga a debole coesione (a sinistra) e valanga a	a
lastrone (destra)	19
Figura 7 Componenti della deformazione all'interno del manto nevoso	20
Figura 8 Dispositivo di taglio utilizzato da McClung per gli studi sulla neve	21
Figura 9 Comportamento hardening (curva a) e comportamento softening (curva b) dei prov	/ini
di neve	22
Figura 10 Curve sforzo-deformazione a taglio per diverse velocità	23
Figura 11 Rigidezza per diverse velocità di deformazione	23
Figura 12 Curva sforzo-deformazione di taglio	24
Figura 13 Dipendenza del modulo di taglio dalla temperatura	24
Figura 14 Influenza della temperatura sul modulo di taglio dinamico	25
Figura 15 Motore passo passo e cilindro	28
Figura 16 Dimensioni del motore fornite dalla casa produttrice	28
Figura 17 Controller motore passo passo	29
Figura 18 Modulo comunicazione con uscita USB	29
Figura 19 Batteria da 24 V	30
Figura 20 Cella di carico C2	30
Figura 21 Cella di carico C2 con dimensioni in funzione del carico nominale	31
Figura 22 Trasduttore di spostamento	31
Figura 23 Scheda tecnica del LVDT	32
Figura 24 Trasduttore di pressione	32
Figura 25 DAQ-9174	33
Figura 26 Vista frontale del telaio	35
Figura 27 - A) Elemento scorrimento in inglidur B) elemento in zinco pressofuso	36
Figura 28 Disegno tecnico dei cuscinetti	36
Figura 29 Cassetto mobile superiore:	37
Figura 30 Particolare dei cuscinetti scorrevoli	37
Figura 31 Piastra zigrinata inserita all'interno del cassetto mobile superiore	38
Figura 32 Pompa manuale per l'inflazione della camera d'aria	39
Figura 33 Vista frontale	40
Figura 34 Vista in pianta	40
Figura 35 Vista laterale	41
Figura 36 Interfaccia grafica di labVIEW	42
Figura 37 Primo blocco	43
Figura 38 Secondo blocco	44
Figura 39 Terzo blocco	45
Figura 40 Curva forza-spostamento carico pari a 25 kg per entrambe le velocità	47
Figura 41 Telaio dell'apparecchiatura	47

Figura 42 Curva di regressione lineare per i risultati dell'attrito su guide per v=10mm/min. I	
valori numerici sono i pesi espressi in kg applicati sulla camera d'aria	49
Figura 43 Costruzione della curva bilatera per l'attrito delle guide a v =10 mm/min	50
Figura 44 Curva di regressione lineare per l'attrito delle guide per v=100 mm/min	50
Figura 45 Dati sperimentali della forza misurata dalla cella di carico nei confronti	52
Figura 46 Curva forza- pressione	53
Figura 47 tensione di taglio e normale al variare dello spostamento del carrello	56
Figura 48 Rappresentazione nel piano tau-sigma	57
Figura 49 Prova del 20/02, h 07:12	59
Figura 50 Tensioni di primo distacco a T2 (sinistra) e tensioni di primo distacco a T1 (destra).	61
Figura 51 Finestra per l'acquisizione dei dati residui	61
Figura 52 Tensioni residue a T1	62
Figura 53 Tensioni residue a T2	62
Figura 54 rappresentazione schematica del contatto neve-malta	63
Figura 55 Posizione satellitare del luogo scelto per la campagna di prova	66
Figura 56 Localizzazione del sito delle prove	66
Figura 57 Zona pianeggiante dove si è svolta la prova	67
Figura 58 Telaio per l'individuazione del piano debole	68
Figura 59 Telaio durente l'esecuzione di una prova	69
Figura 60 Classi di durezza del manto nevoso	70
Figura 61 Fasi di campionamento ed estrazione del provino	72
Figura 62 provino di neve dopo l'esecuzione del test	73
Figura 63 Tensione massima principale $\sigma_1$	75
Figura 64 Vettori degli spostamenti totali	75
Figura 65 Deformazione γ	76
Figura 66 Direzione delle tensioni principali sul piano	76
Figura 67 Prova h 11:42	78
Figura 68 Provino di neve dopo l'esecuzione del test.	78
Figura 69 cerchi di Mohr e inviluppo di rottura	80
Figura 70 prova del 22/02, h 07:07, HP-SS-T2	88
Figura 71 prova del 22/02, 07:27, HP-SS-T2	89
Figura 72 prova del 22/02, h 07:47, HP-SS-T2	90
Figura 73 prova del 21/02, h 03:45, MP-SS-T2	91
Figura 74 prova del 21/02, h 04:15, MP-SS-T2	92
Figura 75 Figura 21 prova del 21/02,h 04:38, MP-SS-T2	93
Figura 76 prova del 21/02, h 02:18, LP-SS-T2	94
Figura 77 prova del 21/02, h 02:51, LP-SS-T2	95
Figura 78 prova del 21/02, h 03:11, LP-SS-T2	96
Figura 79 prova del 22/02, h 03:17, HP-SS-T1	97
Figura 80 prova del 22/02, h 03:47, HP-SS-T1	98
Figura 81 prova del 22/02, h 04:01, HP-SS-T1	99
Figura 82 prova del 22/02, h 01:58, MP-SS-T1	100
Figura 83 PROVA DEL 22/02 02:21, MP-SS-T1	101
Figura 84 prova del 22/02/2019, h 02:47, MP-SS-T1	102
Figura 85 prova del 20/02, h 02:21 , LP-SS-T1	103
Figura 86 prova del 20/02, h 03:08, LP-SS-T1	104

Figura 87 prova del 20/02, h 04:09, LP-SS-T1	105
Figura 88 prova del 22/02, h 06:05, HP-SL-T2	106
Figura 89 prova del 22/02, h 06:22, HP-SL-T2	107
Figura 90 prova del 22/02, h 06:38, HP-SL-T2	108
Figura 91 prova del 21/02, h 07:19, MP-SL-T2	109
Figura 92 prova del 21/02, h 07:35, MP-SL-T2	110
Figura 93 prova del 21/02, h 07:46, MP-SL-T2	111
Figura 94 - prova del 21/02, h 06:28, LP-SL-T2	112
Figura 95 prova del 21/02, h 06:42, LP-SL-T2	113
Figura 96 prova del 21/02, h 06:54, LP-SL-T2	114
Figura 97 prova del 20/02, h 07:12, HP-SL-T1	115
Figura 98 prova del 20/02, h 07:57, HP-SL-T2	116
Figura 99 PROVA DEL 20/02, H 08:31, MP-SL-T1	117
Figura 100 prova del 20/02, h 08:53, MP-SL-T1	118
Figura 101 prova del 19/02, h 08:56, LP-LS-T1	119
Figura 102 prova del 19/02, h 09:15, LP-SL-T1	120
Figura 103 prova del 19/02, h 09:15, LP-LS-T1	121
Figura 104 descrizione del manto nevoso fornita dall'AINEVA	122
Figura 105 prova delle 11:03	124
Figura 106 prova delle 11:24	125
Figura 107 prova delle 11:32	126
Figura 108 prova delle 11:42	127
Figura 109 prova delle 11:51	128
Figura 110 prova delle 11:58	129
Figura 111 prova delle 12:09	130

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Dimensioni dei cuscinetti	36
Tabella 2 Pesi utilizzati nella taratura delle guide e corrispondenti valori di forza d'attrito	48
Tabella 3 Coefficienti angolari delle curve interpolanti	53
Tabella 4 elenco delle prove svolte a Sestriere	79

## Struttura della tesi

La tesi è strutturata in diverse sezioni secondo il seguente schema

- La neve come materiale
- Apparecchiatura di taglio diretto
- Calibrazione dell'apparecchiatura e campagna di prove in Giappone
- Prove in situ

Nel capitolo "La neve come materiale" l'obiettivo è dare una panoramica generale sui processi che riguardano la neve: dalla formazione nell'atmosfera fino alla deposizione al suolo. Sono trattate le trasformazioni che il manto nevoso subisce per effetto di cause termodinamiche. È data anche una caratterizzazione meccanica, elencando lo stato dell'arte delle prove sulla neve.

Nel capitolo denominato "Apparecchiatura di taglio diretto" si descrive il funzionamento del dispositivo per prove di taglio diretto in situ sia nelle parti meccaniche che in quelle elettroniche. È dato risalto alle migliorie che sono state introdotte in questa nuova versione.

Nel capitolo "Calibrazione dell'apparecchiatura e campagna di prove in Giappone" si espone l'attività di calibrazione condotta sul dispositivo di taglio diretto. La taratura è stata utilizzata per la campagna di prove svolta nel centro di NIED in Giappone con lo scopo di investigare il comportamento a taglio tra neve e un blocco di malta cementizia. I risultati poi sono analizzati criticamente e vengono date alcune interpretazioni sul comportamento all'interfaccia tra i due materiali.

Nel capitolo "Prove in situ" si descrivono, infine, le modalità con cui sono state eseguite le prove nella località di Sestriere. I risultati ottenuti vengono confrontati con un modello agli elementi finiti. Nell'ultima parte si analizzano in modo critico le possibili migliorie da apportare alla macchina di taglio.

# **Capitolo 1**

## La neve come materiale

### 1.1 Introduzione

La neve è un tipo di precipitazione atmosferica di acqua ghiacciata cristallina, formata da una moltitudine di minuscoli cristalli di ghiaccio. Essa è un materiale particolare che rientra in quella classe di materiali di interesse per l'ingegneria geotecnica poiché, sia al pari delle rocce o dei suoli, può essere inclusa nella classe di *geomateriali* cioè quei materiali prodotti naturalmente.

## **1.2 Come nasce la neve?**

La formazione di un cristallo di neve inizia nelle nubi. Nell'aria può essere contenuto un quantitativo massimo di vapore acqueo al variare della temperatura. Se l'aria si trova in una condizione di saturazione, un abbassamento di temperatura causa la condensazione.

In una situazione di sovrasaturazione dell'aria con vapore acqueo, le molecole di vapore condensano su piccole particelle chiamate *nuclei di condensazione* (sali, pollini o polveri presenti nell'atmosfera) i quali hanno un diametro medio di 1 µm. Se la temperatura dell'aria è al di sotto di 0 °C, è possibile inoltre che si formino minuscoli cristalli di ghiaccio. A queste temperature le gocce d'acqua si presentano in uno stato sottoraffreddato.

Affinché avvenga la formazione di piccoli cristalli di ghiaccio servono delle particelle differenti, attorno alle quali avviene un processo di solidificazione. Sono necessari dunque dei *nuclei di congelamento o cristallizzazione*. In assenza di questi, le goccioline rimarrebbero sopraffuse, cioè liquide anche a temperature molto al di sotto del consueto punto di solidificazione e potrebbero gelare soltanto a temperature molto basse.

Questi nuclei di congelamento sono molto meno comuni dei rispettivi nuclei di condensazioni necessari per la nascita delle goccioline. Infatti, non tutte le particelle di piccole dimensioni sono adatte a formare nuclei di cristallizzazione, in quando queste devono avere una particolare struttura molecolare. Il numero di questi nuclei di congelamento aumenta con il diminuire della temperatura. Alla temperatura di - 40 °C le goccioline d'acqua cristallizzano da sole senza l'ausilio dei nuclei.

Quando la dimensione e la massa dei cristalli di ghiaccio aumenta ed essi cominciano a subire più sensibilmente l'azione della forza di gravità, iniziando a cadere.

### 1.3 Formazione dei cristalli di neve

Nelle nuvole a un'altitudine di 3000 ÷ 400 m nell'atmosfera l'acqua coesiste nelle sue tre fasi:

- Solida, cioè i nuclei di cristallizzazione
- Liquida, le goccioline d'acqua sottoraffreddata
- Gas, cioè il vapore acqueo presente in condizione di sovra saturazione.

La neve quindi si presenta come un materiale trifasico, la cui matrice solida è composta da grani di ghiaccio e dei pori interstiziali in cui si può trovare o aria o acqua liquida. La frazione di ogni fase dipende dal processo di trasformazione che il nucleo di neve subisce dalla sua nascita.

L'accrescimento del cristallo è dato da due fattori i) a causa della tensione di vapore maggiore di una goccia d'acqua rispetto al cristallo, le molecole di vapore acqueo condensano sul cristallo stesso ii) raggiunta una dimensione sufficiente, i cristalli di ghiaccio precipitano ed entrano in collisione con le goccioline surraffreddate incrementando la dimensione del cristallo.

Durante la loro discesa, questi cristalli attraversano strati di nuvole a differente temperatura (al diminuire della quota si assiste a un aumento della temperatura) e diversi livelli sovrasaturazione dell'aria. In generale i grani arrotondati si formano in presenza di bassa densità di vapore, mentre con densità più elevata si hanno bordi e angoli. La temperatura influisce invece sull'asse di crescita dei grani.

La forma finale di un cristallo di neve nell'atmosfera dipende da una serie di situazioni che si verificano sulla superficie del cristallo. Generalmente i cristalli di ghiaccio hanno tre assi sul piano base dove è presente una simmetria esagonale, e un asse perpendicolare al piano base. In presenza di una bassa densità di vapore in eccesso la forma è solitamente colonnare. Al contrario con alte velocità di crescita, a cui corrisponde una situazione di alta tensione di vapore, la crescita avviene sul piano base e si sviluppano cristalli di forma più complessa ad esempio le dendriti stellari.



Figura 1 Due diversi modi in cui avviene la formazione del cristallo di neve: trasferimento delle goccie d'acqua (a sinistra) e collisione tra i grani e le molecole d'acqua (destra)

## 1.4 Il cambiamento dopo la deposizione

Il cambiamento del cristallo è dovuto a tutta una serie di processi che il nucleo di cristallizzazione affronta dall'istante della nascita fino alla caduta. Anche dopo la deposizione il singolo cristallo subisce un processo di cambiamento nella forma e nella dimensione.

I processi che portano a queste trasformazioni possono essere sia di origine meccanica che termodinamica. In particolare, queste ultime classi di processi prende il nome di metamorfismo, è ed è strettamente connessa con un diverso numero di fattori quali:

- Gradiente di temperatura
- Spessore della copertura del manto nevoso
- Frequenza e intensità dei fenomeni nevosi
- Tipo di cristallografia presente

Si intuisce come possa essere presente uno o più fattori elencati, la loro presenza e intensità influisce sulla varietà di forme che possono essere create. SI fornisce nel paragrafo seguente su alcuni di questi aspetti presentati.



Figura 2 Diverse tipologie di cristalli in relazione alla formazione

## 1.5 Il metamorfismo

#### 1.5.1 Generalità

Il metamorfismo indica le variazioni di forma assunte dai grani di neve nel manto nevoso. Queste variazioni sono provocate sia da gradienti termici sia da effetti meccanici come ad esempio i sovraccarichi.

La velocita di formazione e le forme assunte dai cristalli nel manto nevoso dipendono da: i) gradienti termici ii) temperatura iii) dimensione dei pori. Tra queste variabili la più importante è il gradiente termico che determina la forma dei cristalli. Alti gradienti termici, temperature elevate e alte porosità generano cristalli sfaccettati. Al contrario bassi gradienti termici e temperatura basse producono forme arrotondate. Le maggiori velocità di formazione dei cristalli vengono rilevate in presenza di elevati gradienti termici, alte temperature e ampi spazi vuoti tra i cristalli. In questa situazione si generano grani sfaccettati. Al contrario basse velocità di crescita, a cui corrispondono a bassi gradienti termici, basse temperature e pori di piccole dimensioni, determinano grani arrotondati. Un gradiente di temperature nel manto nevoso è considerato alto se è maggiore di 10 °C /m, al di sotto questo valore cominciano ad apparire forme arrotondate.

I cristalli generati con elevate velocità di crescita danno luogo a neve fragile e instabile che spesso causa valanghe. Si può citare come esempio la brina di superficie, la brina di profondità e la neve sfaccettata.

#### 1.5.2 Tensione di vapore all'interno della neve

Dal punto di vista fisico, possiamo definire la tensione di vapore la pressione alla quale l'aria contenuta nei pori, a una determinata temperatura, può coesistere con il ghiaccio e l'acqua liquida. Essa misura la tendenza di un corpo di passare dallo stato liquido o solido a quello aeriforme. Localmente, nel manto nevoso, possono sopraggiungere variazione nella tensione di vapore all'interno della microstruttura a causa dell'effetto combinato di i) differenze di temperatura ii) differenza di raggio di curvatura del singolo grano.

In particolare, la tensione di vapore assume valori più alti in corrispondenza delle zone più calde e nelle superfici convesse. La presenza di una differenza nella tensione di vapore comporta un trasferimento di massa, dovuta a una evaporazione e successiva condensazione, dalle zone convesse a quelle concave e dalle zone più calde a quelle più fredde.

La temperatura nel manto nevoso varia sia per lo scambio di calore che avviene con il suolo a causa del flusso di calore emanato dalla terra. Nello strato superiore, invece, la temperatura dipende dalle condizioni atmosferiche.

#### 1.5.3 Metamorfismo da equitemperatura.

Se il gradiente di temperatura tra due qualsiasi punti nel manto nevoso è basso e le forme cristallografiche sono per lo più dendritiche (subito dopo la nevicata), si può osservare che il processo prevalente che agisce all'interno del manto nevoso è il cosiddetto *metamorfismo da iso-temperatura*. Questo processo è provocato dalla differenza di tensione di vapore tra le zone concave e quelle convesse. Esso agisce per ristabilire una condizione di equilibrio nella tensione di vapore che quindi corrisponde a una situazione di minima energia libera per il sistema.

Ad esempio, nei cristalli dendritici si assiste a una sparizione dei rami causata da curvature molto elevate, infatti come detto precedentemente la tensione di vapore è più alta su una superficie convessa rispetto una concava

Il trasferimento di massa delle tra i grani di ghiaccio, che evaporano dalle punte dei dendriti di forma convessa e successivamente condensano nelle concavità, produce un arrotondamento progressivo dei cristalli di ghiaccio: il risultato di questo processo è che il grano di neve passa da una forma stellare a una più arrotondata. Si ha quindi la formazione di neve granulare, i cui grani hanno una forma arrotondata di circa  $0,1 \div 2$  mm di diametro.



Figura 3 Metamorfismo di un cristallo di neve

#### 1.5.4 Metamorfismo da gradiente termico

Nel manto nevoso asciutto la temperatura è prossima a 0 °C sul fondo, a causa del calore geotermico e del calore accumulato durante la stagione estiva. La temperatura si abbassa risalendo verso gli strati più alti poiché questa è a contatto con l'aria fredda invernale. Siccome l'aria calda ha un punto di saturazione più alto rispetto a quella fredda, si avrà una maggiore tensione di vapore negli strati di neve sul fondo. Ciò comporta che il vapore acque sarà costretto a risalire. Se nel manto nevoso si assiste ad un alto gradiente di temperatura e i grani di ghiaccio hanno già raggiunto una forma arrotondata, può intervenire il *metamorfismo da gradiente di temperatura*.

Durante questo metamorfismo viene generato un flusso di calore che causa un movimento di vapore verso l'alto per convezione dalle zone più basse del manto nevoso (generalmente più calde) a quelle superiori con trasporto di vapore acqueo. Questo quando viene a contatto con le zone fredde sublima e si deposita sui grani.

Questo metamorfismo avviene rapidamente, non porta una situazione di equilibrio ma piuttosto a dei cristalli sfaccettati. La neve generata detta, brina di profondità, è caratterizzata da cristalli a forma di coppa rovesciata di dimensioni variabili tra i 2 e 5 mm



Figura 4 Flusso di calore all'interno del manto nevoso che causa metamorfismo da gradiente termico

#### 1.5.5 Metamorfismo da fusione e rigelo

Nella neve satura d'acqua il metamorfismo è causato dal flusso di calore che attraversa l'acqua durante la fusione e il rigelo. Esso avviene quando le temperature dell'aria circostante si attestano intorno allo zero termico e avviene una variazione ciclica di temperatura con l'alternarsi del giorno e della notte. Quando la temperatura cresce sopra lo zero, avviene lo scioglimento dei grani più piccoli e l'acqua liquida inizia a percolare verso il basso, finché non raggiunge gli stati più compatti caratterizzati da una bassa permeabilità o il suolo stesso. Quando la temperatura esterna scende sotto il punto di fusione, l'acqua liquida della zona sovrastante del manto nevoso solidifica sui grani più grandi provocandone un aumento di dimensione. Al contrario, l'acqua contenuta nelle regioni più basse rimane liquida e può formare uno stato lubrificante sopra che può provocare scorrimento

#### 1.5.6 Metamorfismo meccanico

Il metamorfismo meccanico è provocato dall'azione del peso proprio che produce un progressivo addensamento degli stati inferiori. Questo metamorfismo è provocato dai nuovi strati di neve a seguito di nevicate. Include in realtà anche gli effetti dell'azione del vento e del trasporto di particelle. L'applicazione di una pressione con un sovraccarico ha l'effetto di accelerare il metamorfismo con la formazione di grani arrotondati.

Questo tipo di metamorfismo è in contrasto con il metamorfismo da gradiente termico nel quale avviene un trasporto di materiale da strati sottostanti a quelli superiori.

### **1.6** La sinterizzazione della neve

#### 1.6.1 Generalità

Gli effetti provocati dal metamorfismo presentati nelle sezioni precedenti non sono chiaramente distinguibili ma che avvengano contemporaneamente nel manto nevoso, in relazione alla temperatura e alle condizioni atmosferiche. Esiste tuttavia un altro processo responsabile di cambiamenti all'interno degli strati nevosi cioè il processo di sinterizzazione.

Questo processo è molto simile al metamorfismo da equitemperatura sebbene agisca indipendentemente da questo e la sua presenza è condizionata dalla cristallografia della neve.

La sinterizzazione è un fenomeno spontaneo che porta a un legame tra i grani di neve se messi in contatto anche senza pressione di contatto e temperatura ben al di sotto del punto di congelamento

#### 1.6.2 Il processo di sinterizzazione

Il processo di formazione di legami tra diversi cristalli di neve viene chiamato sinterizzazione. Ciò che provoca questo fenomeno è il gradiente nella tensione di vapore che provoca il trasferimento di massa dalle zone convesse a quelle concave attraverso un processo di evaporazione e condensazione. In generale la tensione di vapore è più elevata sulle superfici convesse rispetto a quelle concave. Il vapore acqueo tende a sublimare dalle superficie convesse (alta pressione di vapore) e a condensare sulle superfici concave (bassa tensione di vapore) dove i grani sono a contatto per formare delle zone di legame chiamati *colli*. Questo legame comporta quindi la formazione e la crescita dei collari di ghiaccio tra i grani, attraverso un trasferimento di massa delle molecole di ghiaccio dalle zone periferiche del grano fino alla zona di contatto.

Sia il metamorfismo che la sinterizzazione derivano dagli stessi processi chimico-fisici, cioè il trasporto di vapore acqueo da una da una zona ad alta concentrazione fino a una bassa. Nel metamorfismo la forma finale dei grani dipende dalla velocita alla quale avviene il trasporto di vapore, ad alte velocità corrisponderà una forma sfaccettata, alle basse una forma arrotondata. La formazione di questi legami può essere ascritta allo stesso fenomeno.

Essendo la sinterizzazione come il metamorfismo un processo termodinamico, si deduce che all'aumentare della temperatura aumenta la velocità di formazione di legami: a un elevato gradiente termico corrisponde un elevato trasporto di massa che aumenta gli effetti della sinterizzazione. Come nel caso del metamorfismo, la porosità e l'entità del gradiente termico influiscono sul legame finale tra due cristalli. Il legame tra i granuli si ha attraverso la formazione di giunti tra di essi, questo conferisce una sorta di coesione al materiale donando anche una resistenza a trazione e migliorando la resistenza al taglio. Per questo motivo la neve sfaccettata, non essendo soggetta a un processo di sinterizzazione, rimane debole per la durata di vita del manto nevoso.

In generale le forme arrotondate che si producono a bassa velocità di formazione hanno dimensioni minori e tendono a compattarsi maggiormente tra di loro, esse quindi presentano un maggior numero di legami. Al contrario grani sfaccettati di dimensioni maggiori si compattano in misura minore e presentano meno legami. Da ciò deriva che i cristalli di neve con forma arrotondata presentano una resistenza maggiore rispetto ai grani ramificati.



Figura 5 Trasferimento di massa per effetto di un gradiente nella tensione di vapore

### **1.7 Un pericolo della montagna: le valanghe**

#### 1.7.1 Generalità

Si definisce valanga una massa di neve che in caduta può coinvolgere particelle solide di diverse dimensioni quali rocce, terre o ghiaccio. Il pericolo valanghe può causare perdita di vite umane e danni economici alle infrastrutture. Questo rischio è proporzionale al numero di persone esposte, per questo motivo il pericolo è molto elevato in zone montane in cui sta avvenendo sempre più una crescente antropizzazione dei territori.

Lo studio delle valanghe sta assumendo sempre più importanza poiché ci sono una serie di settori che possono essere coinvolti da questi eventi; nel periodo invernale la montagna attrae turisti: strutture di villeggiatura, piste sciistiche o infrastrutture montane rappresentano quindi zone di possibile rischio, ad esempio le valanghe possono arrecare danno alle infrastrutture viarie interrompendo la circolazione stradale e ferroviaria che collega valli tra le montagne. Non dobbiamo dimenticarci dei cambiamenti climatici di questo momento storico. Infatti, l'aumento della temperatura ha degli effetti positivi sull'incidenza delle valanghe in zone montane.

#### 1.7.2 La stabilità del manto nevoso

Il manto nevoso è costituito da una serie di strati di neve depositati in diversi intervalli temporali con caratteristiche fisiche e meccaniche, variabili nello spazio e nel tempo, fortemente dipendenti da fattori meteorologici e morfologici. La stabilità del manto nevoso può essere definita dal rapporto tra la resistenza a rottura e le azioni che provocano instabilità. Di solito la causa scatenante è l'insieme delle forze che agiscono lungo il versante, il peso proprio della neve e la resistenza a taglio del manto stesso.

L'innesco e il successivo distacco di una valanga sono quindi la diretta conseguenza della rottura dell'equilibrio di una parte di manto nevoso presente su un pendio. È possibile distinguere due tipi di fattori che causano la perdita di stabilità del manto nevoso su un pendio inclinato. Essi sono:

- *fattori diretti* come la presenza di strati deboli, l'attrito tra gli strati che influenza il valore di resistenza al taglio e l'eterogeneità delle proprietà della neve nello spazio e nel tempo.
- *fattori indiretti* come la presenza umana (sciatori, oggetti motorizzati), elementi esogeni del manto nevoso (fogliame, detriti), effetti termici (aumento della temperatura della giornata) e sovraccarichi naturali (depositi trasportati dal vento, nuovi strati di neve a seguito di nevicate).

La valutazione della stabilità del manto nevoso è un aspetto importate per l'intervento di prevenzione e mitigazione del rischio naturale in ambiente montano.

È possibile distinguere tra due tipi di valanghe: i) a debole coesione ii) a lastroni fig(6). Le prime sono provocate da una bassa densità del manto nevoso e coinvolgono principalmente gli strati superficiali. Le seconde sono caratterizzata da una rottura interna al manto nevoso, tipicamente dovuta alla presenza di uno strato debole caratterizzato da una particolare microstruttura della neve (brina di fondo o cristalli sfaccettati) che presenta basse proprietà meccaniche rispetto a quelle degli strati confinanti.



Figura 6 Due diversi meccanismi di slavina: valanga a debole coesione (a sinistra) e valanga a lastrone (destra)

La figura 7 mostra le forze agenti sul manto nevoso, si ha una forza perpendicolare al pendio che stabilizza il blocco che rappresenta l'assestamento dovuto al peso proprio. La componente parallela al pendio è la forza di taglio che provoca il distacco della valanga.

Siccome nel fenomeno delle valanghe viene mobilitata la resistenza al taglio è molto conveniente, come suggerito da Mellor (1974), caratterizzare la neve come materiale con un criterio di Mohr-Coulomb, poiché la coesione può essere correlato al grado di sinterizzazione mentre l'angolo di attrito può caratterizzare la forza residua necessaria a mobilitare i grani dopo la rottura dei legami intergranulari (condizione di coesione nulla). Da questi due parametri è possibile trovare una legge che esprima il criterio di rottura tramite Mohr-Coulomb per uno stato di sforzo biassiale

$$(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot sen\varphi = 2c \cdot cos\varphi$$

Che può essere riscritta nelle più conosciuta espressione che lega lo sforzo di taglio allo sforzo normale

$$\tau = c + \sigma \cdot tan\varphi$$

Dove  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  rappresentano gli stati di sforzo principali, *c* rappresenta la coesione,  $\phi$  l'angolo di attrito,  $\tau$  la resistenza al taglio e sigma è lo sforzo normale.



Figura 7 Componenti della deformazione all'interno del manto nevoso

### 1.8 Stato dell'arte

#### 1.8.1 Generalità

Analizzare il comportamento di provini di neve sollecitati con uno sforzo di taglio è uno degli esperimenti principali per capire la formazione delle slavine.

In letteratura è possibile disporre di un elevato numero di prove, ed esse mostrano che la neve granulare si comporta come un materiale elastico-viscoplastico, dipendente dalla temperatura, dalla densità iniziale e dalle pressioni di confinamento. Inoltre, la tempo-dipendenza nelle prove di deformazione è un'altra caratteristica rilevante. Il comportamento microstrutturale che la neve subisce se sono applicati dei carichi, rileva che la sua natura viscosa può essere comparata a un meccanismo de formativo tempo dipendente che avviene tramite il contatto dei grani.

Per la valutazione del rischio quindi vengono utilizzati delle apparecchiature che applicano al provino una deformazione di taglio, responsabile della formazione della valanga in un pendio montano. Essendo la neve un materiale dalle proprietà fortemente variabili, le apparecchiature devono essere in grano di testare il provino in condizioni il più possibile indisturbate.

#### 1.8.2 **Prove di laboratorio**

#### 1.8.2.1 Generalità

I primi esperimenti in laboratorio sulla neve sono iniziati all'inizio del Novecento. In letteratura la prima prospettiva storica riguardante le proprietà meccaniche della neve è stato il lavoro di Mellor (1974). Ha formulato le prime equazioni costitutive e i criteri di rottura. In particolare, ha raccolto risultati sperimentali da studi precedenti e, riunendoli, ha caratterizzato gli intervalli di variabilità delle proprietà della neve (modulo Young, rapporto di Poisson, coefficiente di viscosità,) come funzioni di densità e temperatura. Un altro lavoro pioneristico è stato quello di Fukue (1979) che, analizzando i risultati ottenuti da diversi provini di compressione in condizione confinata, ha studiato i meccanismi di deformazione della neve mostrando come il tipo di rottura è influenzato dal tasso di deformazione applicata.

#### 1.8.2.2 Prove di taglio

Si è visto che il meccanismo che comporta l'insorgere di una valanga coinvolge la rottura a taglio della neve. Per questo motivo le prove di taglio della neve sono sempre state considerate di grande interesse nella formazione delle valanghe.

McClung, (1977). ha studiato il comportamento della neve tramite un'apparecchiatura a taglio a controllo di spostamento (Bjerrum e Landva, 1966), mostrata in fig.8



Figura 8 Dispositivo di taglio utilizzato da McClung per gli studi sulla neve

Dentro tale campionatore, il provino (115 mm di diametro, altezza 16 mm) è posizionato tra due presse di plastica a superficie ruvida per impedire lo scivolamento, esso è circondato da una membrana di gomma rinforzata la quale impedisce variazioni di diametro ma consente variazioni di spessore del campione durante la prova. Queste condizioni al contorno determinano una condizione di deformazione piana. La pressa superiore è fissa sul piano orizzontale ma può spostarsi verticalmente tramite l'applicazione di un carico normale. La pressa inferiore, invece, è completamente fissata a un carrello che è movimentato orizzontalmente da un motore per indurre la deformazione di taglio. Il motore applica una deformazione variabile tra  $7 \cdot 10^{-6} \, s^{-1} \, e \, 5 \cdot 10^{-8} \, s^{-1}$ . Lo spostamento verticale e orizzontale del campione è misurato con due trasduttori di spostamento lineare. La forza orizzontale applicata è rilevata da estensimetri che misurano la deformazione.

Le prove effettuate da McClung sono state svolte con neve la cui densità varia in un range di  $150 \div 400 \text{ kg/m}^3$  a un intervallo di temperatura tra i -10 e -6 °C. le prove sono svolte a controllo

di spostamento, effettuate a tre differenti tassi di spostamento: 8.95 *mm/h*, 0.73 *mm/h* e 0.13 *mm/h*. Essendo difficile effettuare il campionamento della neve le prove sono state eseguite su provini con caratteristiche differenti. Per distinguere l'eterogeneità dei provini McClung propone di dividerli in due categorie: i) prove svolte a bassa velocità ii) prove solte ad alta velocità



Figura 9 Comportamento hardening (curva a) e comportamento softening (curva b) dei provini di neve

I risultati mostrano che il tipo di rottura dipende dalla velocità di deformazione. Nel primo caso (curva a) viene osservato un comportamento *hardening* del materiale, in questo caso la tensione di taglio aumenta con lo spostamento orizzontale e non è possibile definire un punto dove avviene rottura; nel secondo caso (curva b) si osserva l'allungamento dal provino con un comportamento *softening*. In questo test lo sforzo di taglio aumenta fino al raggiungimento di un picco, dopodiché si assiste a una progressiva perdita di resistenza fino a che non si raggiunge un ramo residuo nel quale lo sforzo rimane costante.

Il risultato in termini di sforzo di taglio è mostrato in fig .9 La difficoltà di interpretazione dei risultati è ascrivibile, come detto in precedenza, alla grande variabilità nelle densità dei provini campionati e nel fatto che essi sono assoggettati a diverse storie di carico prima di effettuare la prova a taglio.

Anche Scweizer (1998) ha condotto delle prove utilizzando il dispositivo descritto in precedenza. Analizzando la neve arrotondata, ha valutato separatamente gli effetti di tasso di deformazione e temperatura. Ai provini viene applicata una forza normale di 4.9 N che corrisponde a una pressione di 0.47 kPa in tutte le prove e la densità media inziale era di 290  $kg/m^3$ In seguito sono mostrati i risultati delle prove.

#### Influenza della velocità di deformazione

Le curve sforzo-deformazione a taglio per tre differenti livelli di deformazione sono mostrate in fig.10 Le prove sono state eseguite a una temperatura costante pari a -15 C. La curva a, riferita a una bassa velocita di deformazione, mostra un comportamento *softening* con un significativo

tratto duttile accompagnato da grandi deformazioni. La curva c invece mostra il risultato del test svolto alla velocita più alta, in cui si assiste a una rottura fragile dopo una piccola deformazione. La curva b, la cui velocità di deformazione è intermedia, mostra un andamento compreso tra le due curve descritte in precedenza. In queste prove la transizione tra lo stato duttile e fragile è ottenuta ad una velocità di deformazione di circa  $1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ .

Si osserva inoltre che le tensioni a rottura diminuiscono di un ordine di grandezza con l'aumentare della velocità di deformazione



Figura 10 Curve sforzo-deformazione a taglio per diverse velocità

Si nota come la rigidezza, data dalla tangente alla curva, aumenta all'aumentare della velocità di deformazione. In figura è mostrato il valore di rigidezza in funzione del tasso di deformazione.



Figura 11 Rigidezza per diverse velocità di deformazione

#### Ruolo della temperatura

La temperatura alla quale viene svolta la prova influenza alcuni dei parametrici meccanici. Ad esempio, la resistenza e la rigidezza aumentano mentre la deformazione a rottura diminuisce con il diminuire della temperatura. L'aumento della temperatura corrisponde quindi a una transizione tra una rottura fragile e una duttile.

Inoltre si osserva figura 12 che il valore dello sforzo di taglio diminuisce al crescere della temperatura e una volta raggiunto il valore massimo il taglio tende a seguire un andamento orizzontale



Figura 12 Curva sforzo-deformazione di taglio

La rigidezza rappresentata dal modulo tangente iniziale della curva sforzo-deformazione a taglio è un parametro fortemente dipendente dalla temperatura, essa raddoppia passando da - 5 ° C a - 15 ° C come mostrato in figura 13



Figura 13 Dipendenza del modulo di taglio dalla temperatura

Anche Camponovo and Schweizer (2002) hanno studiato l'influenza della temperatura sul modulo di taglio dinamico. I risultati si ottengono con misurazioni continue di oscillazione durante otto ore tramite apparecchio di taglio torsionale. La temperatura del campione varia in un intervallo compreso tra i  $-7 \circ C$  a  $-20 \circ C$  e successivamente a  $-1 \circ C$  e di nuovo a  $-7 \circ C$ . Si nota(figura 14), concordemente allo studio precedente, che all'aumentare della temperatura si assiste a una diminuzione del modulo di taglio.



Figura 14 Influenza della temperatura sul modulo di taglio dinamico

# **Capitolo 2**

# Apparecchiatura di Taglio

### 2.1 Introduzione

Nel capitolo precedente sono state presentate alcuni dispositivi per lo studio del comportamento a taglio del manto nevoso. In questo capitolo si fornisce la descrizione della macchina per l'esecuzione di prove in situ di taglio sulla neve progettata dal Politecnico di Torino. Questa macchina consente la valutazione delle proprietà meccaniche degli strati deboli di neve in zona a rischio valanghe. Essa, similmente a una apparecchiatura di taglio diretto, consente di applicare uno sforzo normale e tangenziale rispetto alla direzione in cui avviene lo scorrimento. L'attrezzatura ha un peso di 7 kg e ciò la rende sicuramente molto maneggevole.

## 2.2 Generalità

In una prima versione della macchina (Barbero et al.), si operava una prova a controllo di carico tramite un attuatore pneumatico a doppio effetto (modello Metal Work RBNDC), costituito da un cilindro con diametro pari a 32 mm e corsa uguale a 25 mm, in grado di sviluppare una forza in estensione di circa 400 N a 5 bar.

Il controllo dello sforzo di taglio avveniva tramite una valvola proporzionale, la quale permette va la regolazione della pressione interna tramite controllo dell'intensità di corrente. Il carico tangenziale era applicato tramite il programma labVIEW, nel quale era richiesto di definire una rampa di carico, imponendo il valore finale di sforzo di taglio e l'intervallo di tempo per il raggiungimento di tale valore. La lettura dell'intensità di forza avveniva tramite un trasduttore integrato nel dispositivo attivato con una differenza di potenziale di 24 V. Anche la forza normale veniva applicata per mezzo di un sistema pneumatico. La sorgente per applicare la pressione era costituita da una piccola bombola monouso di azoto  $(N_2)$  a 110 bar. La forza normale era applicata immettendo in pressione la camera d'aria posta nella parte superiore del campione.

Una seconda versione della macchina, oggetto di questo capitolo, prevede l'introduzione di un motore passo-passo che ha consentito di eseguire dei test a controllo di deformazione. Inoltre, il sistema pneumatico necessario per applicare la pressione normale è cambiato: la bombola di azoto utilizzata è stata sostituita con una pompa manuale. Il dispositivo è stato utilizzato in una campagna di prove svolte in Giappone con lo scopo di investigare il comportamento a taglio dell'interfaccia tra neve e malta cementizia.

I passi per l'esecuzione della prova sono i seguenti: i) Tramite il programma labVIEW vengono definiti i parametri della prova ii) Viene immessa l'aria in una membrana di gomma nella parte superiore della scatola di taglio con una pompa manuale per applicare una pressione normale. iii) il motore elettrico trasmette un carico tangenziale alla parte superiore della scatola di taglio attraverso la controspinta dello stelo metallico sulla cella di carico. iv) Gli spostamenti dovuti all'applicazione del taglio, pressioni normali e forza di taglio sono registrati rispettivamente dal trasduttore di spostamento, dal trasduttore di pressione e dalla cella di carico con frequenza di campionamento di 200 Hz. Lo sforzo di taglio esercitato sull'interfaccia è definito come  $\tau = F / A$ , dove A è 256 cm<sup>2</sup>.

## 2.3 Componenti della apparecchiatura

La macchina di prova è costituita da parti meccaniche atte alla trasmissione di pressioni, forze e sforzo di taglio al provino, componenti elettroniche per il comando e la trasmissione dati (input) e per l'acquisizione e il controllo (output). Nel seguente elenco viene fornita la descrizione delle componenti che formano la macchina.

- Motore passo-passo e cilindro
- Cella di carico
- Trasduttore di spostamento LVDT
- Membrana elastica accoppiata a una piastra zigrinata in materiale polimerico
- Pompa manuale
- Batteria 24 V
- Termocoppie per la misurazione della temperatura della neve
- Sistema di acquisizione e controllo

#### Motore elettrico e cilindro

L'esecuzione della prova di taglio avviene tramite un motore elettrico prodotto dalla EUROSEI della serie "ECR" che è fissato al cassetto mobile superiore tramite due staffe metalliche a forma di L.

Questo motore viene utilizzato per le applicazioni che richiedono movimenti e posizionamenti precisi ( $\pm 0.3$  mm).

In figura vengono fornite le dimensioni dello strumento dalla casa produttrice. Il motore è formato da due parti, i) motore che fornisce energia per l'esecuzione della prova ii) il cilindro metallico che contiene lo stelo, il quale applicando una controspinta sulla cella di carico realizza il movimento del cassetto superiore.



Figura 15 Motore passo passo e cilindro



#### Dimensioni principali - Overall dimensiona

Figura 16 Dimensioni del motore fornite dalla casa produttrice

La prova avviene a controllo di spostamento grazie alla presenza di un *controller(fig 16)*, tramite esso è possibile controllare le posizioni iniziali e finali dello stelo contenuto all'interno del cilindro meccanico. È possibile inoltre impostare l'accelerazione e la velocità che assumerà il motore durante la prova. Il controller è collegato al computer tramite un *modulo di comunicazione* 

(COM 17) cioè una scheda usb che permette il collegamento tra le due parti. La figura seguente rappresenta lo schema a blocchi del sistema di trasmissione dati dal computer al motore.





Figura 18 Modulo comunicazione con uscita USB

Il motore è alimentato per mezzo di una batteria portatile di 24 V (fig18). Il peso complessivo è di 2.9 kg e le dimensioni sono 165 x 160 x 110 mm. La capacità nominale è di 24 Ah±5%, il range di temperatura, se non alimentata a una presa elettrica, è -10÷60°C.



Figura 19 Batteria da 24 V

#### Cella di carico



Figura 20 Cella di carico C2

Per misurazione la forza si utilizza una cella di carico in acciaio inossidabile con carico nominale di 500N, essa soddisfa i requisiti della ECM (direttiva compatibilità elettromagnetica) secondo la EN45 5011. Le alterazioni dovute alle imprecisioni della verticalità dello strumento sulla misurazione della forza sono trascurabili.

In figura è riportata l'immagine della cella di carico di tipo C2 utilizzata nella macchina di taglio diretto su neve e i relativi disegni tecnici, nella tabella sono riportati i dati forniti dalla casa produttrice della cella di carico in funzione del carico nominale

Dimensioni (in mm)

50



Figura 21 Cella di carico C2 con dimensioni in funzione del carico nominale

20

300

97

44

15,5

30

50

La classe di precisione dello strumento è dello 0, 2%, la sensibilità nominale dello strumento è di 2 mV/V con una tolleranza dello  $\pm 0$ , 2%, la tensione di alimentazione di riferimento è di 5 V, il campo operativo di temperatura va da -30 °C a +85 °C.

4xM16

#### Trasduttore di spostamento

155

90

125



Figura 22 Trasduttore di spostamento

Il trasduttore utilizzato per misurare lo spostamento è un trasformatore differenziale variabile prodotto dalla RDP-group. Effettua una misurazione accurata della posizione dello stelo scorrevole rispetto al corpo del trasduttore che rimane fisso rispetto la macchina. Questo trasduttore utilizza il principio del trasformatore differenziale variabile lineare (LVDT) che è capace di fornire una tensione in uscita proporzionale allo spostamento del nucleo. Il vantaggio del principio del sensore LVDT è che, non essendoci alcun contatto elettrico, i dati ottenuti sono meno affetti da rumore puliti ottenendo una risoluzione maggiore.

DCW500 to DCW8000							
Туре	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X (nom)	Total weight	Armature weight	Inward over-travel
DCW100	±2.5mm (±0.1")	±0.5/±0.25	2.66"	1.3"	4.4oz	0.05oz	0.38"
DCW200	±5mm (±0.2")	±0.5/±0.25	2.66"	1.3"	4.4oz	0.06oz	0.28"
DCW300	±7.5mm (±0.3")	±0.5/±0.25	2.66"	1.3"	4.4oz	0.06oz	0.18"
DCW400	±10mm (±0.4")	±0.5/±0.25	2.66"	1.3"	4.4oz	0.07oz	0.08"
DCW500	±12.5mm (±0.5")	±0.5/±0.25/±0.1	7.99"	1.5"	8.6oz	0.68oz	0.4"
DCW1000	±25mm (±1")	±0.5/±0.25/±0.1	9.09"	2.5"	10.6oz	0.90oz	0.9"
DCW2000	±50mm (±2")	±0.5/±0.25/±0.1	13.94"	3.0"	14.1oz	1.40oz	0.4"
DCW3000	±75mm (±3")	±0.5/±0.25/±0.1	18.50"	4.5"	1.2lb	2.00oz	0.9"
DCW4000	±100mm (±4")	±0.5/±0.25/±0.1	19.80"	5.0"	1.4lb	2.51oz	0.4"

Figura 23 Scheda tecnica del LVDT

### Trasduttore di pressione



Figura 24 Trasduttore di pressione

Per misure la pressione all'interno della camera d'aria si utilizza un trasduttore di pressione amplificato UNIK 5000 (modello PMP 5076 TA A1 CA H0 PA). Ha un corpo in acciaio inox e può misurare un range di pressioni che varia da  $0\div500$  *bar* (garantendo una precisione fino a  $\pm 0.04\%$ ), l'intervallo di temperatura alla quale il dispositivo può funzionare varia tra  $-10\div50$  °C.

#### Sistema di acquisizione e controllo



Figura 25 DAQ-9174

L'apparecchio utilizzato per l'acquisizione dei dati è un DAQ-9174 prodotta dalla National Instrument.

Il DAQ-9174 è uno chassis CompactDAQ USB alimentato tramite bus progettato per sistemi di misura con sensori portatili, di dimensioni compatte.

Un sistema DAQ (sistema di acquisizione analogico-digitale) permette di collegare il software con il "mondo esterno".

Può essere connesso ad un computer 32 bit con sistema operativo Microsoft Windows, è possibile eseguire simultaneamente sette operazioni con temporizzazione hardware, con tre frequenze indipendenti di input analogico, inoltre esso consente la lettura sincronizzata di tutte le schede inserite. L'acquisitore in questione permette di alloggiare quattro differenti schede (moduli) e trasmettere i dati a labVIEW tramite un collegamento diretto via cavo al computer con una porta USB. A ogni scheda possono corrispondere più canali.

Le schede sono le seguenti: una per la cella di carico, una per i diversi trasduttori, una per il motore passo-passo ed infine l'ultima per le termocoppie. Alle schede di acquisizione vengono associati più canali cioè un segnale elettrico che deve essere convertito in valore numerico. Le schede hanno tutte funzione diversa, ad esempio la scheda collegata al motore è una scheda di alimentazione, la scheda cella di carico ha la funzione di alimentare gli estensimetri elettrici contenuti al suo interno, i trasduttori di spostamento e di pressione invece sono già alimentati (internamente è presente un sistema che converte il segnale magnetico in segnale elettrico tramite una batteria da 12 V) la loro scheda serve quindi a registrare gli spostamenti.

Il range di umidità relativa del dispositivo è tra il 10% e il 90%. Il suo peso è di circa 574 g, la temperatura operativa minima è di -20 °C e la massima quota è di 2000m s.l.m. Si riportano le caratteristiche dei differenti moduli.

- NI 9237 ±4 canali, ± 25 mV/V, 24-Bit, modulo ponte simultanea
  Il modulo per ingressi a ponte a campionamento simultaneo ha una accuratezza di 24 bit, gli ingressi analogici con connettori RJ50 sono di ± 25mV=V. Ha una velocità di campionamento 50 kS/s. La sua temperatura di esercizio varia da -40°C a 70°C.
- NI 9205 32 canali, da ±200 mV a ±10 V, 16-Bit, modulo di input analogico Il modulo di input analogico ha 32 canali, 16 canali analogici differenziali, un canale di input ed uno di output digitale. La sua risoluzione è di 16 bit, le tensioni nominali possono essere ±10 V, ±5 V, ±1 V e ±0, 2 V. La sua temperatura di esercizio varia da -40°C a 70°C.
- NI 9211 Termocoppia

Questo modulo può connettere quattro termocoppie, ha un tempo di conversione di 420ms e l'errore minimo è dello 0, 06% mentre il massimo è dello 0, 1%, in altre parole l'errore massimo nel campo di applicazione dello strumento che va da -40° a 70°C, è di 0, 6°.

 NI 9263 4 canali, ± 10 V, 16-bit analogico di tensione, modulo di uscita Questo modulo ha il compito di convertire i bit di input analogici in volt di output. Nel nostro caso serve per inviare gli impulsi elettrici al regolatore di pressione in base a dati imposti dal computer. Ha 4 canali di output, mentre il campo di applicazione della temperatura va da -40°C a 70°C, il suo peso è di 150 g, l'umidità relativa operativa minima è del 10% e la massima del 90% e la massima altitudine è di 2000m.

## 2.4 Meccanica

Nella nuova versione del dispositivo è stato introdotto un motore elettrico in grado di operare delle prove a controllo di spostamento al posto del precedente sistema pneumatico. La taratura di questo nuovo dispositivo sarà trattata nel capitolo 3. Il dispositivo è composto da due parti:

- Telaio fisso che costituisce il supporto a cui vengono collegati il cassetto superiore e la cella di carico.
- Cassetto mobile in cui si verificano gli spostamenti che vengono impressi al provino, collegato al cassetto troviamo il motore passo-passo e la camera d'aria.

Il telaio fisso è formato da una base metallica di dimensione 160 160 x 40 mm saldato a due coppie per ogni lato di profilati metallici a sezione U (20 mm x 20 mm) posti verticalmente. Saldati a questi troviamo due elementi scatolari (20 mm x 20 mm) posizionati in direzione orizzontale. Questi elementi sono collegati da una maniglia che ha la funzione di trasporto dell'intera apparecchiatura. Unito tramite delle viti troviamo la scatola dove viene inserita sempre con delle viti la cella di carico.

Il telaio descritto serve supporto per lo scorrimento del cassetto durante la prova sia come campionatore, saldati ai profilati a U troviamo due lame inferiori con una distanza di due millimetri rispetto il telaio principale che facilitano la penetrazione nella neve. Un coltello metallico viene inserito nella parte inferiore per chiudere il campionatore.

La dimensione del provino è  $160 \times 160 \times 72 \text{ mm}$ . Quindi In mezzeria dove avviene la formazione del piano di rottura l'area del provino è di  $256 \text{ mm}^2$ .



Figura 26 Vista frontale del telaio

Il cassetto mobile viene collegato al telaio tramite delle guide in alluminio anodizzato a basso attrito a profilo quadrato che vengono utilizzate come superficie di scorrimento. Le guide lineari funzionano a secco quindi sono esenti da manutenzione e insensibili a fattori quali sporco, acqua, agenti chimici, calore o colpi. Inoltre, hanno una rumorosità molto ridotta dovuta ai materiali utilizzati.

Le guide hanno una funzione di supporto per i cuscinetti (fig 27) formati da due parti i) *il rivestimento esterno* in zinco pressofuso ii) *l'elemento di scorrimento* con la tecnologia di autolubrificazione *iglidur*®; questa tecnologia fa uso di diversi componenti: polimeri di base per la resistenza all'usura, fibre e riempitivi che rinforzano i cuscinetti per assorbire sollecitazioni o carichi di spigolo elevati, lubrificanti solidi indipendenti nel cuscinetto che riducono l'attrito del sistema. Il vantaggio di questa tecnologia è che anche in assenza di lubrificazione presenta un basso attrito.

I cuscinetti sono solidali al cassetto superiore. Il moto del cassetto è quindi vincolato dalle guide e lo scorrimento avviene tramite la controspinta dello stelo metallico contenuto dentro al motore elettrico. Le schede tecniche vengono riportate negli allegati.



Figura 27 - A) Elemento scorrimento in inglidur B) elemento in zinco pressofuso



Figura 28 Disegno tecnico dei cuscinetti

Elemento	Dimensione (mm)
A3	6,5
В	26
C1	29
C3	16
К2	5
Nel carrello mobile figura 29 si trovano due ingressi dove vengono inseriti i tubicini per l'immissione dell'aria nella membrana e per il collegamento del trasduttore di pressione. In figura 30 vengono evidenziati i cuscinetti saldati sul cassetto mobile, che si inseriscono nelle guide permettendo lo scorrimento del cassetto.



Figura 29 Cassetto mobile superiore: 1) pannello superiore 2) metà superiore della scatola 3) Viti di fissaggio 4) Collare metallico di chiusura 5) Viti di fissaggio motore passo-passo 6) innesto dei tubicini per la camera d'aria e per il trasduttore di pressione 7) cuscinetti autolubrificanti.



Figura 30 Particolare dei cuscinetti scorrevoli

Il cassetto mobile (fig 29) è composto di due parti principali: il pannello superiore (1) e la metà superiore della scatola (2). Il pannello superiore è costituito da una piastra di alluminio, spessore 8 mm fresato per una profondità di 2 mm per ottenere la camera d'aria. Questo pezzo è serrato alla metà superiore della scatola con l'uso di viti (3) che trattengono in mezzo la membrana elastica. Sopra alla metà superiore della scatola viene impiegato un collare (4) di alluminio per ottenere un perfetto accoppiamento con il pannello superiore e ottenere e sigillare la camera d'aria. La forza di taglio è applicata al cassetto grazie al motore passo-passo, fissato al pannello superiore per mezzo di due staffe a L (5); l'asta del cilindro pneumatico in estensione preme sulla cella di carico che è posta rigidamente sul telaio fisso. Per assicurare la corretta direzione di penetrazione, i profili a U verticali contengono anche le guide per quattro barre in composito di carbonio che devono essere inserite nella neve prima del campionamento. Tutte la parti in acciaio sono state trattate con un processo di fosfatazione colorata per proteggere le superfici da ossidazione e corrosione.

Sulla camera d'aria viene fissato tramite nastro adesivo una piastra zigrinata Fig(31) in materiale polimerico. La presenza di scanalatura migliora l'efficacia con la quale il taglio viene trasmesso al provino.



Figura 31 Piastra zigrinata inserita all'interno del cassetto mobile superiore



Figura 32 Pompa manuale per l'inflazione della camera d'aria

Nelle figure 33,34 e 35 vengono mostrate le viste laterale, frontale e in pianta della macchina. Si evidenzia:

- Cella di carico (A) fissata alla custodia metallica tramite quattro viti e resa solidale al telaio.
- Trasduttore di pressione (B) che viene legato tramite delle fascette all'elemento metallico a U, per minimizzare il disturbo dovuto all'esecuzione della prova viene utilizzato del materiale isolante che viene inserito tra la macchina e il trasduttore stesso. La misurazione della pressione avviene poi tramite inserimento del tubicino rosso alla parte sommitale del cassetto mobile.
- Motore passo-passo con cilindro metallico (C)
- Trasduttore di spostamento (D)
- Cassetto scorrevole supportato dal telaio della macchina tramite dei cuscinetti (E),
- Cassetto inferiore (F)



Figura 33 Vista frontale



Figura 34 Vista in pianta



Figura 35 Vista laterale

# 2.5 Software di gestione

L'interfaccia grafica avviene tramite il programma LabVIEW 2018 che permette la progettazione e la gestione dei dati. I programmi realizzati con questo software sono chiamati Virtual Instrument e sono composti da due parti:

- *Interfaccia grafica* che permette all'utente si stabilire i parametri con il quale avverrà la prova, essa deve essere necessariamente semplice in modo da rendere accessibile il dialogo utente programma.
- *Diagramma blocchi* che sintetizza il processo di funzionamento del programma tramite un editor grafico.

#### 2.5.1 Interfaccia grafica



Figura 36 Interfaccia grafica di labVIEW

In figura 36 è mostrata l'interfaccia grafica di labVIEW, è possibile selezionare la massima accelerazione/decelerazione assunta dal motore durante l'esecuzione della prova; a causa di questa variazione di velocità, la variazione di spostamento non è costante durante nel tratto iniziale e finale delle prove.

*Phase current* permette di imporre l'intensità di corrente erogabile nel motore, a titolo d'esempio durante le prove in campo, descritte nel capitolo 4, si è utilizzato un valore di 3000 *mA*. Il valore massimo erogabile non deve essere mai maggiore di 4000 *mA*.

La casella *motor homing* permette di muovere il pistone metallico dal motore. Bisogna realizzare un contatto tra lo stelo metallico e la cella di carico. Tale contatto potrà essere letto nella finestra *Force (daN)*.

In *Velocity* si impostano i parametri di velocita espressi in *mm/min e* il massimo spostamento a fondo corsa del LVTD (*Max displacement*). Il massimo spostamento imponibile è di 25 cm. Una volta scelte queste impostazioni si salvano tramite l'opzione save.

Prima di iniziare la prova, bisogna azzerare sia gli spostamenti letti in *displacement (mm)* sia eventuali forze di contatto tra pistone e cella di carico tramite i pulsanti verdi indicati in figura 36. Si procede poi all'immissione manuale dell'aria all'interno della camera d'aria, questa ultima presenta due entrate: una per l'immissione dell'aria e l'altra è collegata al trasduttore di pressione che registra la pressione presente all'interno.

Una volta raggiunta la pressione d'interesse la prova può essere avviata tramite il comando *Run*. A causa delle forti perdite presenti nella camera d'aria, specialmente se la prova presenta una lunga durata, può essere necessario dover aumentare manualmente la pressione. Durante la prova bisogna monitorare il valore registrato dalla cella di carico per evitare che venga superato il valore di 50 *daN*, interrompendo la prova se necessario.

Una volta portata a termine la prova tramite il comando *Return* lo stelo ritornerà in posizione di partenza, con *End test* si uscirà dall'ambiente di LabVIEW

#### 2.5.2 Diagramma a blocchi

LabVIEW è un linguaggio di programmazione. La scrittura del codice avviene tramite diagramma a blocchi. Il vantaggio di LabVIEW è quello che permette di svolgere operazioni logiche in parallelo grazie alla presenza di cicli *while (loop)*, che sono operazioni logiche che si ripetono finché sussistono alcune condizioni.

I colori delle linee hanno vari significati: il giallo gestisce gli errori, il viola indica la porta seriale, il blu si riferisce ai valori numerici interi, verde sono le porte *vero/ falso*, arancione indica il *double floating*. Lo spessore di queste linee è riconducibile alla dimensione del dato contenuto dentro: una linea sottile indica il singolo valore, una più spessa rappresenta un vettore mentre una doppia linea indica una matrice. Si mostra ora la *routine* utilizzata dal dispositivo di taglio

1. Il primo blocco (fig 37) è dedicato al *set data iniziale* cioè la configurazione inziale dei parametri della macchina. Grazie alla presenza di questo blocco, avviene la comunicazione direttamente con l'interfaccia grafica descritta in precedenza. In questo blocco sono possibili varie operazioni: azzerare i valori misurati, fermare l'avanzamento del test e uscire dall'esecuzione del programma.



Figura 37 Primo blocco

2. Nel secondo blocco avviene la *configurazione del motore*. In questa *routine* troviamo le istruzioni per la gestione dell'avvio della prova. Essa è composta da cinque fasi. Ad ogni fase corrisponde un comando visto nell'interfaccia grafica. Le fasi sono le seguenti: 1) Rientro del pistone nel motore elettrico, questa operazione avviene ogni 100 millisecondi (Comando *in*) 2) Uscita del pistone di uno step per volta (comando *out*) 3) Inizializzazione del motore per essere predisposto alla prova di taglio) (*Motor setting*) 4) Avvio della fase di taglio (*test setting e run*) 5) Ritorno del motore alla posizione iniziale una volta conclusa l'applicazione del taglio (*return*).



Figura 38 Secondo blocco

3. Il terzo blocco è la fase in cui avviene *l'acquisizione dei dati*, in cui i valori registrati vengono mostrati in schermata. Anche questo blocco è formato da un ciclo *loop*. Sono processati tutti e quattro i canali più la temperatura; essa ha una scheda a parte poiché, se normalmente i canali vengono campionati con una frequenza di 2 kHz, la temperatura è acquisita in maniera più lenta (un dato ogni secondo).

In questa fase posso azzerare i valori iniziali tramite spunta verde da *interfaccia grafica*. I dati vengono conservati in un buffer (un parcheggio dati) e successivamente trasferiti ogni dieci secondi nell'hard disk solo se la prova è avviata, altrimenti vengono cancellati. I dati vengono salvati ogni dieci secondi sul computer, poiché Windows ha tempi di acquisizione diversi rispetto al software, infatti gli orologi del computer e di labVIEW non sono esattamente sincronizzati. Utilizzando il buffer, la scheda del computer lavora in maniera indipendentemente da labVIEW, se il computer acquisisse i valori ogni secondo si poterebbe caricare eccessivamente creando problemi di spazio, rischiando la loro perdita.

LabVIEW acquisisce i dati come una funzione d'onda, cioè i valori sono tutti acquisiti nello stesso intervallo di tempo. I dati sono successivamente salvati in un formato leggibile da Diadam (un programma di acquisizione dati). Diadem permette di lavorare sulle forme d'onda e permette di fare operazioni quali fitting di curve, trasformate di Fourier.



Figura 39 Terzo blocco

# **Capitolo 3**

# Calibrazione dell'apparecchiatura e campagna di prove in Giappone

### 3.1 Calibrazione delle guide scorrevoli

Allo scopo di ottenere i valori effettivi delle forze di taglio durante le prove sperimentali sui campioni di neve, si è reso necessario tarare la macchina determinando le forze di attrito che si generano nelle guide scorrevoli che supportano il cassetto superiore. Poiché la resistenza di attrito delle guide dipende sia dal carico normale che dalla velocità relativa tra le parti in movimento, è necessario conoscere i valori della resistenza al variare del carico. A tale scopo è stata capovolta la macchina e, al posto del provino, si è caricato il cassetto superiore con pesi di valore diverso in modo da simulare il carico normale della macchina a vuoto cioè senza il provino all'interno. Il cassetto mobile superiore della macchina poggia sulle guide; con lo scorrimento del carrello si crea una forza d'attrito. Il valore di forza misurata corrisponde quindi, con buona approssimazione, al valore di attrito delle guide che costituisce quindi una proprietà della macchina. Si vuole trovare una curva che, al variare del peso gravante sulle guide, restituisca il valore di attrito delle guide.

Si sono svolte tre prove per ogni carico e velocità, caricando la camera d'aria con pesi crescenti. Sulle guide grava un carico permanente dato dalla somma del peso al cassetto superiore e del motore elettrico; il peso totale (N) che agisce sulle guide è la somma del peso permanente (cassetto mobile superiore e motore,  $m_{up}$ = 3832 g) e dei pesi esterni applicati ( $m_{ext}$ )

$$N = (m_{up} + m_{ext})g \tag{1}$$

Sono state eseguite tre prove per ogni carico per le velocità di deformazione v pari a 10 e 100 mm/min e un fondo corsa di 5 mm. Il grafico (fig.40) rappresenta l'andamento della resistenza

dovuta all'attrito delle guide durante lo spostamento del cassetto che viene registrata dalla cella di carico



Figura 40 Curva forza-spostamento carico pari a 25 kg per entrambe le velocità

Analizzando la figura 40, si nota che il grafico inizialmente presenta un andamento crescente, quasi verticale: questo tratto rappresenta la corsa che deve compiere il pistone metallico, contenuto nel motore elettrico, per entrare in contatto con la cella di carico. Superata la corsa a vuoto dello stelo, si presenta un picco di resistenza dovuto alla forza di attrito statico. Successivamente per il resto della corsa la resistenza si mantiene pressoché costante, a un valore soglia, a meno di un segnale di disturbo che verrà successivamente filtrato. Nell' ultima parte il diagramma decresce in modo repentino fino ad annullarsi.

Si è poi proceduto a un filtraggio dei dati tramite un'interpolazione degli stessi. La forza T che identifica la forza di attrito corrispondente a un certo carico normale N che è calcolato come media dei valori nell'intervallo  $1 \div 4 mm$  cioè nel tratto in cui avviene il *plateau* della curva forza-spostamento.



Figura 41 Telaio dell'apparecchiatura con inserite le guide per lo scorrimento del cassetto mobile

La prova avviene a controllo di deformazione: tramite il programma LabVIEW è possibile impostare la velocità di esecuzione della prova. Il vantaggio di questo tipo di prova è che permette di seguire il comportamento post-picco del materiale infatti, quando avviene la rottura, il materiale esibisce un tratto residuo caratterizzato dalla perdita di resistenza.

Si nota (fig. 40) inoltre che per velocità crescenti, la forza di attrito esplicata dalle guide aumenta per il contributo di effetti dinamici che ostacolano l'avanzamento delle guide.

Si è proceduto alla costruzione della curva T-N (tabella 2). Per ogni valore di peso applicato sulla camera d'aria è stato aggiunto il peso del motore e del carrello mobile superiore il cui peso grava sulle guide. Si è misurato il corrispondente valore di sforzo di taglio misurato dalla cella di carico. Per ogni carico si sono svolte tre prove come si evince dalla tabella.

Carico[kg]	Carico+peso	T <sub>g</sub> [daN]	T <sub>g</sub> [N]	
	fisso[N]			
3	66.9	1.688	16.88	
	66.9	1.641	16.41	
	66.9	1.664	16.64	
5	86.5	1.920	19.20	
	86.5	1.916	19.16	
	86.5	1.832	18.32	
10	135.6	2.104	21.04	
	135.6	2.104	21.04	
	135.6	2.342	23.42	
15	184.6	2.455	24.55	
	184.6	1.748	17.48	
	184.6	2.584	25.84	
25	282.7	2.823	28.23	
	282.7	2.769	27.69	
	282.7	2.831	28.31	
35	380.8	3.492	34.92	
	380.8	3.483	34.83	
	380.8	3.498	34.98	
40	429.9	3.731	37.31	
	429.9	3.485	34.85	
	429.9	3.584	35.84	

Tabella 2 Pesi utilizzati nella taratura delle guide e corrispondenti valori di forza d'attrito

Per ciascuna prova di taratura delle guide è stata estratta una coppia di valori N-T. In figura 42 sono diagrammati i valori di forza peso e forza di attrito delle guide. Quest'ultimo valore di forza deve essere sottratto dalla forza di taglio, misurata durante l'esecuzione di una prova, per ottenere il suo reale valore. L'equazione correttiva, espressa in Newton, per la velocita v = 10 mm/min è





Figura 42 Curva di regressione lineare per i risultati dell'attrito su guide per v=10mm/min. I valori numerici sono i pesi espressi in kg applicati sulla camera d'aria

La tangente della curva, di valore 0.053, rappresenta l'attrito dinamico delle guide  $(\mu_d)$ . L'angolo di attrito vale quindi:

$$\varphi_d = \arctan(\mu_d) = \arctan(0.053) = 3.0^{\circ} \tag{4}$$

Data l'impossibilita di indagare il comportamento della curva per valori di *N* minori di 3,8 kg, sono state fatte tre assunzioni: i) Se si applica una forza di entità pari al peso permanente ma di verso opposto si ottiene una configurazione in cui le guide non sono caricate: in tale configurazione è raggiunto il minimo valore di attrito ed è assunto un comportamento lineare. ii) In assenza di possibili misurazioni al di sotto del valore minimo m<sub>up</sub>=3,82 kg, non è possibile conoscere il comportamento della curva  $T_g=T(N)$ . Se si assume valida la prima ipotesi, cioè quella di un comportamento lineare, si ha la formazione di un'intercetta. L'ipotesi di avere un attrito non nullo quando le guide non sono caricate non ha un preciso significato fisico; tuttavia nelle applicazioni pratiche le pressioni utilizzate sono molto distanti da questa condizione. iii) Una volta che la curva  $T_g=T(N)$  raggiunge il valore minimo, il comportamento delle guide è poi assunto simmetrico. La rappresentazione grafica di ciò che è stato spiegato si trova nella seguente figura.



Figura 43 Costruzione della curva bilatera per l'attrito delle guide a v =10 mm/min

Si riporta anche l'equazione correttiva nel caso di v = 100 mm/min

50 45 ..... 40 (35) 35 1 (25) 30 . <u>ا</u> 25 ۲ ع (15) 8 (10) 20 (5) 15 10 (3) 5 0 0 50 100 150 250 300 200 350 400 peso N [N]

 $T_g = 0.076N + 14.74$ 

Figura 44 Curva di regressione lineare per l'attrito delle guide per v=100 mm/min

La tangente della curva, di valore 0.076, rappresenta l'attrito dinamico delle guide  $(\mu_d)$ . L'angolo di attrito vale quindi:

$$\varphi_d = \arctan(\mu_d) = \arctan(0.076) = 4.4^{\circ} \tag{6}$$

Questi valori verranno usati nell'interpretazione delle prove in cui lo forza di taglio misurato è epurato della componente di forza attrito dovuta alle guide.

## 3.2 Taratura pressione normale

#### 3.2.1 Generalità

L'obiettivo di questa seconda taratura è quello di stabilire quale sia effettivamente la pressione trasmessa al provino dalla camera d'aria. In questa procedura, descritta dettagliatamente in questo paragrafo, è stata utilizzata la cella di carico per misurare lo sforzo normale applicato dal sistema pneumatico che agisce attraverso la presenza di una camera d'aria.

La camera d'aria, collocata nella parte superiore dalla scatola di taglio, consiste in una membrana in lattice a forma quadrata 16x16 *cm*, il cui bordo viene fissato al lato inferiore del carrello superiore, ad essa è incollata una piastra zigrinata in materiale polimerico per aumentare l'efficacia della trasmissione del taglio al provino.

L'aria è immessa nella camera d'aria tramite un tubicino, posto nel lato superiore del carrello scorrevole, collegato con una pompa meccanica.

In condizioni ideali cioè se non ci fossero fenomeni di dissipazione la forza misurata  $N_n$  dovrebbe essere uguale a  $pA_n$ , dove  $A_n$  è l'area di riferimento (160 mm × 160 mm). In questo caso vale:

$$N_0 = pA_0 < pA_n = N_n \tag{7}$$

Dove  $A_0$  è un'area ridotta.

In realtà la pressione trasmessa al provino è minore rispetto quella misurata dal trasduttore all' interno della camera d'aria per la presenza di due fattori: i) *dissipazioni intrinseche* del sistema come l'attrito della piastra zigrinata contro le pareti del cassetto del dispositivo; ii) *dissipazioni geometriche* legate alla forma della camera d'aria gonfiata: infatti immettendo l'aria nella membrana in lattice, essa assume una deformata che non è piana ma una superficie curva. È necessario pertanto stimare quale sia la porzione di questa superficie a contatto con la piastra perché al variare dell'area di contatto si determina un diverso valore di sforzo normale applicato. L'area A<sub>0</sub> definita nell' equazione (7), tiene conto di questi effetti elencanti e di conseguenza la forza misurata N<sub>0</sub> è quella ridotta per la presenza di dissipazione.

Per queste ragioni si esegue un secondo set di prove in modo da trovare una relazione tra la pressione e il corrispondente sforzo normale applicato al provino.

#### 3.2.2 Procedura operativa per la taratura dello sforzo normale

In questo paragrafo si descrive la configurazione e l'interpretazione della prova per la taratura della pressione trasmessa dalla camera d'aria.

Si è utilizzata nuovamente una configurazione rovesciata dell'apparecchio. Sopra la membrana d'aria sono stati posizionati i seguenti elementi (dal basso verso l'alto):

- Un blocco di polistirolo di dimensioni 160 mm x 160 mm x 16 mm (lunghezza x larghezza x altezza)
- Un massetto di legno di dimensioni 160 mm x 160 mm x 160 mm
- La cella di carico (30,5 *mm* di altezza)
- Una serie di spessori metallici di differenti altezze (7 mm, 9 mm e 13 mm)

Vengono usati differenti fogli metallici per simulare diversi spessori di confinamento per la camera d'aria: infatti sottraendo all'altezza totale della apparecchiatura, pari a 72 mm, le altezze elencante troviamo la massima distanza verticale concessa per l'inflazione della membrana: minore è lo spazio totale, maggiore è la superficie di contatto tra camera d'aria e piastra zigrinata che comporta una maggiore forza normale trasmessa.

Ai tre spessori dei fogli metallici ( $h_s=7 mm$ , 9 mm e 13 mm) delle lamelle corrisponde uno spazio disponibile per l'espansione della membrana ( $h_{camera}$ ) rispettivamente pari a 6 mm, 4 mm, 0 mm. Per ogni spessore sono state eseguite varie prove, l'esecuzione della prova consiste nelle seguenti fasi: i) gonfiaggio della membrana di gomma raggiungendo la pressione desiderata (punto di avvio della prova) ii) Acquisizione dei dati sperimentali tramite LabVIEW con la cella di carico iii) Apertura graduale della valvola di controllo della pompa manuale per ridurre la pressione dalla camera d'aria.



Figura 45 Dati sperimentali della forza misurata dalla cella di carico nei confronti

della pressione nella camera d'aria

L'interpretazione delle prove è stata eseguita usando uno script Matlab mostrato negli allegati. In figura 45 è diagrammato l'andamento della forza registrata nella cella di carico al variare della pressione misurata dal trasduttore nella camera d'aria. Per le diverse prove, in cui sono stati utilizzati diversi colori per rappresentare i diversi spessori metallici, si nota la presenza di un tratto decrescente in maniera lineare fino ad arrivare ad un intercetta negativa. Poiché una pressione negativa non ha significato fisico, si è deciso di operare una modifica alla curva: si è dunque creata una curva bilatera (fig 45) dove alle pressioni negative è sostituito un tratto orizzontale.

Il significato fisico attribuito alla curva bilatera è il seguente: nel primo tratto orizzontale si ha un aumento di pressione a fronte di una forza nulla registrata dalla cella di carico; questo andamento orizzontale rappresenta una soglia di pressione necessaria alla camera d'aria per entrare in contatto con il provino affinché sia registrata la forza.

Per ottenere l'espressione che lega forza-pressione, si è eseguita un'interpolazione lineare dei dati; queste curve (fig 46) sono state estratte utilizzando tutti i dati sperimentali ricavati dalle prove in laboratorio per i diversi spessori utilizzati.

In tabella 3 vengono rappresentati i coefficienti derivanti dall'interpolazione delle prove

Spazio camera aria[mm]	<b>Coefficiente angolare</b>
6	20,75
4	20,47
0	20,15
Media	20,46

Tabella 3 Coefficienti angolari delle curve interpolanti



Figura 46 Curva forza- pressione

Si nota che le curve, ognuna rappresentante un differente spessore del foglio metallico, non differiscono molto tra di loro. Si è quindi tracciata l'equazione della retta interpolante che fornisce l'andamento medio. Il coefficiente angolare di questa retta rappresenta l'effettiva area di contatto  $A_0$  tra membrana e campione siccome è un rapporto tra una forza e una pressione. L'area ridotta  $A_0$  è minore rispetto all'area nominale  $A_n$  per effetto della deformazione della membrana. Allo stesso modo la pendenza media data dal coefficiente angolare della curva interpolante, è minore rispetto alla pendenza media della curva nominale il cui coefficiente angolare è 25,6.

L'equazione finale ottenuta tramite interpolazione lineare vale quindi

$$N_0 = 20,46 \, p + 0,71 \tag{9}$$

Con  $N_0$  espresso in Newton, *p* espresso in  $N/m^2$ .

Si può definire allora un parametro adimensionale che esprime il rapporto tra l'area ridotta  $A_0$  e l'area nominale  $A_n$ .

$$k = \frac{A_0}{A_n} = 0.797 \tag{10}$$

La pressione effettiva applicata sul provino  $\sigma_n$  è collegata alla pressione nella camera d'aria tramite la relazione  $\sigma_n = kp$ .

Una seconda riduzione dell'area deve essere tenuta in considerazione: con l'avanzamento della prova avviene uno scorrimento relativo tra le due parti dell'apparato, tale scorrimento provoca una riduzione nell'area di contatto tra le due parti.

Se non ci fosse la riduzione dell'area, sul campione agirebbe una forza N pari a:

$$N = \sigma_n A_n \tag{11}$$

Dove  $A_n$  è l'area intera, siccome avviene una riduzione dell'area la forza totale si mantiene costante; chiamando u(x) lo spostamento della scatola:

$$N = N(u)$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_n A_n$$

A<sub>c</sub> è l'area effettiva che è esprimibile in funzione dell'area intera infatti:

$$A_c = A_n - 2du$$

Sostituendo nell'espressione precedente si ricava che

$$\sigma_c = \sigma_n \frac{A_n}{A_c}$$

$$\sigma_n = \frac{A_n}{A_n - 2du}$$

$$\sigma_n \frac{1}{\left(1 - 2\frac{du}{A_n}\right)}$$

Ovvero

$$\sigma_c = \frac{k \cdot p}{1 - 2 \cdot \frac{u}{d}} \tag{12}$$

Dove d rappresenta la dimensione trasversale della scatola di taglio e k in questo caso è un coefficiente adimensionale che rappresenta il rapporto tra l'area ridotta per effetto della forma geometrica della membrana e quella ideale.

Si analizza ora lo sforzo di taglio, nella cella di carico viene registrato una forza, da tale valore bisogna sottrarre lo sforzo di taglio dovuto all'attrito delle guide. Dividendo la forza misurata per l'area si ricava il valore dello sforzo tangenziale

Anche qui sono state eseguite le correzioni dovute alla riduzione di area per effetto dello scorrimento tra i due cassetti

$$A_c = A_n \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{u}{d}\right) \tag{13}$$

Lo sforzo di taglio all'interfaccia vale quindi

$$\tau = \frac{T - T_g}{A_c} \tag{14}$$

Dove *T* è la forza di taglio registrata dalla cella di carico,  $T_g$  è la forza di attrito delle guide stimata al paragrafo precedente. Si nota che T<sub>g</sub> è funzione del carico normale (il carico nominale  $N_n = kpA_n$ )

Si riporta a titolo di esempio le correzioni applicate a una prova svolta in Giappone. È rappresentato l'andamento di tensione normale e dello sforzo di taglio. Tutti i test sono stati svolti a una velocità v = 10 mm/min. Nella prova si evidenziano la presenza di picchi iniziali in cui si arriva a raggiungere una tensione di 7 kPa, a questi picchi corrisponde una caduta di tensione normale. Nella parte finale della prova lo sforzo di taglio si mantiene pressoché costante



Figura 47 tensione di taglio e normale al variare dello spostamento del carrello



Figura 48 Rappresentazione nel piano tau-sigma

In figura 47 si può notare che nell'intervallo di spostamento di 3÷5 mm si ha un aumento della tensione tangenziale con la formazione di picchi tensionali, tale comportamento è dovuto al primo distacco tra malta e neve. A seguito della rottura si raggiunge un valore costante di sforzo di taglio.

Si nota inoltre che, per effetto delle perdite d'aria, risulta impossibile mantenere una pressione costante durante l'esecuzione dell'intera prova; i picchi, nel grafico  $\sigma$ - $\delta$ , sono la conseguenza al tentativo manuale di mantenere una pressione costante durante l'esecuzione della prova.

Si suggerisce nell'esecuzione delle prove di eseguire prove aventi velocità di deformazione più rapide possibili. La difficoltà maggiore consiste nell'elaborare un modello concettuale di curva di rottura, tale curva siccome la neve è un materiale le cui proprietà cambiano in funzione sia del tempo e della temperatura , la conseguenza di ciò è quella di una superficie di rotture che evolve nel tempo, la coesione può essere identificata come un legame tempo dipendente (*sinterizzazione*) tra i vari grani e l'angolo di attrito può essere pensata come caratterizzante l'iniziale resistenza necessaria per disaggregare la neve ma anche la resistenza residua una volta che si sono rotti i legami si nota come la sinterizzazione della neve avvenga con tassi di avanzamento piuttosto rapidi

Il lavoro di taratura è stato utilizzato per la campagna di prove svoltasi in Giappone nel febbraio del 2019. In tali prove, descritte nel paragrafo seguente, si è provocato uno scorrimento di un blocco di neve creato artificialmente su un blocco di malta.

# 3.3 Test condotti in Giappone

Nel seguito si descrive la campagna di prove svolte dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino tra il 18 e il 22 Febbraio nella camera fredda del centro di ricerca di Neve e Ghiaccio di NIED (Nagaoka, Giappone) sotto la guida del Dr. Satoru Yamaguchi. Lo scopo di queste prove sperimentali, usando l'apparecchiatura di taglio, è quello di studiare il comportamento all'interfaccia tra un provino di neve ed un blocco in malta cementizia.

La versione di apparecchiatura utilizzata per queste prove reca alcune novità rispetto alla versione precedente: la sostituzione del sistema pneumatico con un motore elettrico. Tale modifica consente di svolgere dei test a controllo di spostamento, utili per analizzare il comportamento post-picco.

Nei test avviene scorrimento tra due superfici artificiali, nello specifico:

- Il provino inferiore è costituito tra un blocco di malta cementizia di dimensioni 155 mm x 155 mm x 40 mm. Sono stati creati nove provini artificiali. Il vantaggio dell'uso della malta è che richiede una creazione veloce e facilmente riproducibile.
- Il provino superiore è costituito da neve di granulometria scelta di dimensioni 160 mm x 160 mm x 32 mm. La neve scelta per essere campionata è stata raccolta al di fuori del centro ricerche del Giappone ed è stata setacciata per avere una granulometria adatta alla prova. La densità della neve variava tra i 430 kg/m<sup>3</sup> e 460 kg/m<sup>3</sup>

Sono stati svolti 32 test (oltre ai test di calibratura dell'apparecchiatura) variando 3 parametri, per ogni condizione sono state svolte 3 prove. I parametri oggetto di modifica sono:

- *Pression*e: sono state utilizzate tre diverse pressioni normali imposte dalla camera d'aria. Le tre pressioni sono quelle di 5.1 *kPa*, 7.7 *kPa* e 10,2 *kPa*. Le sigle corrispondenti a queste tre pressioni sono LP (low pressure), MP (medium pressure) e HP (high pressure).
- *Temperatura*: Le prove sono state svolte a due diverse temperature della camera fredda, rispettivamente indicate con T1 (-10 °C) e T2 (-15 °C)
- *Sinterizzazione:* I campioni sono stati compattati con due diversi tempi di *sinterizzazione.* Il primo è lo *short sintering e* (SS) in cui i provini sono stati ottenuti con un tempo di *sinterizzazione* di 20 minuti seguiti da 5 minuti di compattazioni sotto un carico di 10 *kgf*, il secondo è il *long sintering* (LS), qui i provini hanno avuto un tempo di sinterizzazione della durata di di 20 ore, seguiti dalla stessa tipologia di compattazione dello *short sintering*

#### 3.3.1 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione delle prove segue gli stessi criteri visti in precedenza. Nei grafici si rappresentano i risultati dello sforzo di taglio registrato dalla cella di carico e lo sforzo normale applicato dalla camera d'aria sul campione il cui valore viene registrato dal trasduttore di pressione.

Osservando il diagramma (fig. 49) si nota inizialmente un breve tratto crescente in cui non avviene contatto tra il cassetto mobile e il provino, in questo tratto non si verificano spostamenti relativi tra il blocco di malta e la neve ma solo tra apparecchiatura e provino. In seguito, si assiste ad un incremento dello sforzo di taglio, questa situazione corrisponde alla formazione della rottura tra interfaccia dei due materiali. Ai picchi registrati per lo sforzo di taglio corrisponde una netta perdita di pressione, questo comportamento può essere dovuto a un effetto di "dilatanza" tra i grani di neve e la superficie rugosa della malta. Dopo tali picchi, a cui corrisponde la formazione di una superficie di rottura, segue un comportamento residuo in cui lo sforzo di taglio si mantiene costante.

Per ognuna delle 32 prove, sono stati estrapolate due coppie di valori che vengono rappresentate nel piano  $\sigma$ - $\tau$  (fig. 50, 52 e 53) per studiare l'influenza della sinterizzazione e della temperatura sui campioni. Il primo valore estratto è quello che corrisponde al picco iniziale. A tale valore corrisponde, come detto precedentemente, l'inizio della formazione della superficie di rottura. Il secondo è quello residuo in cui lo sforzo di taglio si mantiene stabile. Si nota che non sempre il valore di picco è maggiore di quello residuo.



Figura 49 Prova del 20/02, h 07:12

#### 3.3.1.1 Influenza della pressione

Si analizza l'influenza della pressione normale nei provini (fig. 50 a sinistra). Si nota che a un aumento di pressione normale corrisponde un aumento dello sforzo di taglio, cioè aumentando il confinamento aumenta anche la forza necessaria per far scorrere il provino di neve sul blocco cementizio. Per una prova a T1-SL (fig. 50 a sinistra), si passa da un massimo sforzo di taglio di 4 *kPa* nella condizione di *low pressure*, ad una  $\tau$  di 7 *kPa* nella condizione di *middle pressure*, infine nella con un *high pressure* la tensione tangenziale è maggiore di 10 *kPa*.

#### 1.1.1.1 Influenza della sinterizzazione

La sinterizzazione comporta un incremento di legame tra i grani di neve di natura tempodipendente, essa ha influenza sulla coesione e sulla rigidezza del campione di neve. Se si analizzano i risultati di due prove (fig. 50) si nota che, a parità di temperatura, l'aumento del tempo di sinterizzazione comporta un incremento della resistenza al taglio nei provini. Tale effetto è marcatamente più evidente alle alte pressioni in cui un lungo tempo di sinterizzazione può raddoppiare la resistenza di primo distacco mobilitata. In realtà all'interfaccia tra i due materiali non è corretto parlare di sinterizzazione (in quanto questo fenomeno riguarda solo la neve) ma di adesione tra malta-neve. Si può affermare che nei campioni, il cui tempo di sinterizzazione dura 20 h, è avvenuto un fenomeno di adesione che riguarda l'interfaccia tra i due materiali. Usando le riprese video si nota che nei campioni in cui il tempo di sinterizzazione è basso emerge un comportamento poco coeso in cui di verifica il crollo parziale del provino.

#### 1.1.1.2 Influenza della temperatura

Si analizzano i dati nel piano  $\tau$ - $\sigma$  per i valori di *primo distacco*. I provini sono stati portati a rottura con due diverse temperature T1 < T2. Si osserva che una temperatura maggiore comporta un lieve abbassamento della resistenza a taglio mobilitata. Tuttavia, l'effetto della temperatura sui provini non è così influente come la *sinterizzazione*, analizzando le curve si nota che la differenza di temperatura non incide di molto sul valore finale della resistenza al taglio, infatti per pressioni simili la differenza di sforzo di taglio è inferiore al kiloPascal.

Poiché l'influenza della temperatura sulla resistenza a taglio e minore rispetto agli altri parametri, si rappresentano le curve a iso-temperatura analizzando gli effetti del tempo di *sinterizzazione* sui provini.

Si analizzano prima i dati condizione di T1 per poi osservare la condizione di T2. La curva blu rappresenta i provini il cui tempo di *sinterizzazione* è di 20 h. Appare evidente che la *sinterizzazione* comporta l'aumento della resistenza al taglio mobilitata. Nella curva grigia (fig. 50), il cui tempo di *sinterizzazione* è più corto, si nota come i dati abbiano una grandissima dispersione e presentano un R<sup>2</sup> prossimo allo zero, ciò indica che i dati non sono correlabili. L'andamento di questa curva, nel caso dello *short sintering*, sembra orizzontale e non subire l'influenza della pressione normale.

Anche nel caso delle prove condotte a T2, si nota come un maggiore tempo di *sinterizzazione* aumenti la tensione di primo distacco.



Figura 50 Tensioni di primo distacco a T2 (sinistra) e tensioni di primo distacco a T1 (destra)

Si rappresentano gli stessi grafici precedenti, rappresentando ora i valori residui. Per ciascun campione è stata individuata un intervallo di spostamenti (fig 51) in cui si ha il comportamento residuo, cioè dove  $\tau$  ha un andamento orizzontale (in genere in un intervallo di spostamento compreso tra i 11 *mm* e 18 *mm*). Esso è stato ottenuto come media dei valori all'interno di una finestra spaziale. Con la stessa proceduta si è ottenuto il valore di  $\sigma_{residuo}$ .



Figura 51 Finestra per l'acquisizione dei dati residui

Per le tensioni residue valgono le stesse osservazioni fatte per le tensioni di primo scorrimento. Si osserva tuttavia una generale diminuzione dei valori di sforzo di taglio a parità di pressione normale. Anche qui si conferma la grande variabilità dei risultati per i test a *short-sintering* e il loro andamento sub-orizzontale.



Figura 52 Tensioni residue a Tl



Figura 53 Tensioni residue a T2

#### 3.3.2 Adesione malta-neve

Nell'interpretazione delle prove sono stati estratti due valori: il primo si riferisce alla *tensione di primo distacco* che si registra nella prima parte del test, il secondo valore osservato, in cui lo sforzo ha andamento stabile, il secondo valore si riferisce alla *tensione residua*. Al valore di picco viene associata il primo distacco malta – campione. Nelle curve si notano dei valori di picco seguiti da un rapido calo di tensione. Una possibile spiegazione della presenza dei picchi è quella della propagazione di una rottura all' interfaccia neve – malta.

Non è chiaro quale sia la natura delle forze che governa l'interazione tra i due materiali, si può supporre che ci siano delle forze di adesione. Quando al provino viene imposto uno spostamento, il blocco di neve comincia ad accumulare energia, che è necessaria per generare una superficie di rottura all'interfaccia. Una volta creata una nuova superficie di discontinuità, si assiste a una perdita di tensione.

Non sempre nelle prove la resistenza di picco corrisponde a quella massima; specialmente a basse pressioni appare evidente come la resistenza residua sia maggiore di quella di picco. Nel paragrafo seguente si ipotizzano alcune possibili cause dell'adesione tra le due superfici.

• Cementificazione tra la neve e la malta

Secondo quanto già esposto, la *sinterizzazione* consiste in un processo di cementificazione tra i grani tramite diffusione del vapore all'interno dei pori della matrice nevosa. Si è ipotizzato che un meccanismo simile possa avvenire all'interfaccia neve-malta, cioè un legame tra i due materiali. Nell'interfaccia la neve a contatto con il blocco cementizio può essere schematizzata come dei grani a contatto con una superficie rugosa. La tensione di vapore è più elevata nelle superfici convesse rispetto che quelle concave. Il vapore acqueo tende a migrare da queste superfici convesse (alta tensione di vapore) fino ad arrivare alle superfici concave (bassa pressione di vapore) dove solidifica nuovamente creando un legame. Questo comporta il nascere di una cementificazione granulo-malta in grado di aumentare la resistenza a scorrimento. Ci sono altri fattori che contribuiscono alla velocità di formazione di questi legami come la geometria dei grani, la temperatura e la porosità del materiale



Mortar layer

Figura 54 rappresentazione schematica del contatto neve-malta

• Formazione di acqua all'interfaccia acqua-malta

Si è ipotizzata la possibilità di formazione di acqua allo stato liquido all'interfaccia che potrebbe, lubrificando il provino, diminuire l'adesione malta-neve.

Se avviene uno spostamento relativo all'interfaccia, a causa dell'attrito tra le due superfici, viene generato del calore che localmente porta alla formazione di acqua liquida. *Mellor (1975)*, riferendosi allo scorrimento della neve su un'altra superficie, ha definito un *coefficiente di attrito cinematico*, tale coefficiente di attrito  $\mu_k$  dipende dalla l'area di contatto, dalla forza di confinamento, e dalla temperatura. La velocità di esecuzione potrebbe influenzare  $\mu_k$  poiché con l'aumentare di essa aumentano gli sforzi di attrito generati tra malta e neve. In letteratura sono disponibili alcuni valori di  $\mu_k$  che variano tra  $0, 1 \div 0, 4$ .

Tuttavia *Mellor* afferma che affinché si possa formare l'acqua si debbano verificare due condizioni i) alte velocità di rottura ii) temperature prossime alla fusione. Se queste due condizioni non vengono rispettate si deve parlare di *coefficiente di attrito statico* che è il caso limite a cui tende il *coefficiente cinematico*. Il valore del coefficiente statico è maggiore rispetto al suo corrispettivo cinematico. Le prove eseguite in Giappone sono state svolte con una temperatura tra -5 e -10 °C e con velocità di 10 mm/ min. Quindi la formazione di acqua liquida nelle prove effettuate in Giappone resta incognita.

• Rugosità della malta

La superficie della malta presenta una serie di micro-rugosità. La presenza di picchi nelle prove sperimentali condotte in Giappone potrebbe essere dovuta da quest'ultima. I picchi sono quindi causati da un maggiore sforzo richiesto ai grani di neve per vincere la rugosità della malta. Con l'avanzamento della prova alcuni di questi grani possono occupare le concavità della malta rendendo questa superficie più liscia. La riduzione di rugosità tra le due interfacce potrebbe comportare una tensione residua minore. Questa ipotesi trova riscontro nella sperimentazione sui provini: dall'esame dei provini è emerso che, a prova terminata, in alcune zone si erano create delle aderenze tra neve e malta. In queste zone è possibile che lo scorrimento sia avvenuto all'interno del campione di neve dovendo mobilitare una resistenza allo scorrimento minore.

# **Capitolo 4**

# **Prove in situ**

## 4.1 Introduzione

Questo capitolo è organizzato nel seguente modo: la prima parte è dedicata alla descrizione della campagna di prove che si è tenuta a Sestriere e all'elenco delle procedure operative che si sono seguite per l'esecuzione dei test. Segue una seconda parte dove vengono analizzati criticamente i risultati delle prove. Questi vengono confrontati con un modello agli elementi finiti allo scopo di analizzare il comportamento della macchina. Nell'ultima parte si analizzano in modo critico le possibili migliorie da apportare alla macchina di taglio con riferimento ai risultati ottenuti

# 4.2 Organizzazione dell'uscita

È stata organizzata un'uscita sul campo con lo scopo di effettuare delle prove di taglio diretto su dei campioni di neve. L'inverno 2019 è stato, dal punto di vista metereologico, caratterizzato da una assenza di nevicate abbondanti e dal punto di vista climatico interessato da temperature elevate rispetto la media stagionale, per questo è stato difficile individuare una zona adatta all'esecuzione delle prove.

Sono state organizzate diverse riunioni con il gruppo di ricerca per scegliere un luogo adatto all'esecuzione della prova. Da tali riunioni è emerso che l'area scelta per le prove dovesse avere le seguenti caratteristiche:

- Luogo di facile accesso.
- Necessità di uno spazio pianeggiante in modo da poter preparare l'attrezzatura di prova.
- Deposito di neve fresca che avesse uno spessore modesto in modo da essere campionata correttamente.



Figura 55 Posizione satellitare del luogo scelto per la campagna di prova

La scelta del luogo è ricaduta sulla zona di Sestriere in un'area poco lontana dal centro abitato. È stata valutata anche la possibilità di organizzare la campagna di prove in Valle d'Aosta che nel 2013 è stata interessata da un'uscita analoga nella zona di Gressoney-La-Trinitè.



Figura 56 Localizzazione del sito delle prove

È stato possibile raggiungere il luogo prescelto è stato raggiunto percorrendo una strada carrabile. Non essendo stata trovata una zona pianeggiante dove ci fosse uno spessore di neve adeguato, si è deciso di organizzare la prova nella seguente maniera: i) è stata predisposta la macchina su un tavolo portatile di cui si è assicurata la perfetta orizzontalità affinché la pendenza non influisse sulla prova ii) Sul versante (figura 56) venivano preparati dei provini che erano successivamente trasportati alla base di esso dove era collocato l'apparecchio (fig.57) affinché si eseguisse la prova di taglio.

La parte elettronica (computer portatile e batteria da 24 V) è stata lasciata nell'automobile per evitare che le basse temperatura influissero sul funzionamento.

Il 23 marzo del 2019 è avvenuta l'uscita in campo per l'esecuzione delle prove di taglio diretto su neve. Il giorno prima della uscita in campo si è controllata tramite una lista la completezza delle attrezzature necessarie per l'esecuzione della prova per evitare di arrivare impreparati il giorno dell'esecuzione della prova (vedi elenco negli allegati).

L'orario di partenza è stato fissato per le 7:30 nei pressi del Politecnico di Torino; la fase preparatoria dei provini e l'avvio delle prime prove, per testare il corretto funzionamento della macchina, sono avvenute per le ore 10:00. In totale sono state effettuate una decina di prove (incluse le prove di preparazione). Alle 12:09 si è conclusa la campagna di prove. Nella giornata, la temperatura si è attestata sopra lo 0°C, l'avanzare della giornata ha fatto sì che la temperatura aumentasse fino a raggiungere +8 °C.



Figura 57 Zona pianeggiante dove si è svolta la prova

# 4.3 Analisi e interpretazione della struttura del manto nevoso

Lo studio del manto nevoso viene eseguito per desumere i parametri che possono provocare la formazione di una valanga.

Si possono presentare due tipi di valanghe: le valanghe a debole coesione e le valanghe a lastroni. Le prime si innescano negli stati più alti del manto nevoso e quindi coinvolgono soltanto la parte superficiale di esso. Le seconde sono provocate da una rapida rottura all'interno del manto nevoso dove si mobilita la resistenza al taglio su un piano di debolezza.

La macchina progettata è adatta allo studio della resistenza a taglio dello strato del manto nevoso, quindi si presta bene per lo studio della seconda tipologia di valanghe.

La rottura nel caso di valanghe a lastroni avviene su piani la cui resistenza a taglio è inferiore alla componente tangenziale del peso del manto soprastante. Lo spessore di questi strati deboli varia tra 1 e 100 mm. Essi sono facilmente individuabili tramite sondaggio nelle zone in cui si assiste variazione di durezza. Ci sono vari indici che testimoniano la presenza di un *weak layer* all'interno del manto nevoso.

- *Durezza*: la resistenza al taglio è proporzionale alla durezza che può essere stimata con il test della mano. In questo test per misurare la durezza della neve vengono pressati contro la superficie nevosa degli oggetti, costituiti da piastre circolari di diverse dimensioni, per creare una rottura per compressione. Queste piastre, di area nota, vengono appoggiati sul manto nevoso. La forza misurata, quando avviene la rottura, fornisce il valore per compressione della durezza. In base agli standard internazionali le variazioni di rigidezza vengono rilevate applicando una forza di 5 kg (50 N) al manto nevoso. Infatti, applicando forze minori non si riescono ad apprezzare significative variazioni nel manto nevoso.
- *Dimensione e forma dei grani*: questo aspetto influisce sulla resistenza della neve. Un aumento della resistenza della neve è collegato a una forma piccola e arrotondata dei grani di neve, ad esempio la neve pallottolare è costituita da grani di neve aventi grandi dimensioni e quindi scarsa resistenza, al contrario i grani con forme allungati sono spesso causa di piani deboli.
- *Sinterizzazion*e la cementificazione dei grani è forse l'aspetto che più di tutti contribuisce a determinare l'esistenza di un piano debole.
- *Contenuto di acqua libera*: la presenza di acqua libera ha come conseguenza una diminuzione della resistenza.

Un altro metodo per indentificare la presenza di uno strato debole è l'utilizzo del *test del telaio manuale*; questa prova è efficace per la valutazione della resistenza al taglio degli stati più deboli della neve. Per tale test è necessario procurarsi un telaietto da taglio e un dinamometro. Il telaio di taglio è costituito da un'intelaiatura solitamente rettangolare in acciaio inossidabile o alluminio di spessore variabile (da 0,5mm a 2,0mm) separata in scomparti da elementi metallici. Dopo l'individuazione dello strato debole si rimuove la neve fresca e con il telaio viene spinto con i bordi paralleli allo strato debole e leggermente sopra di esso. Successivamente, si inserisce il dinamometro nell'apposito gancio e si esercita una forza di trazione costante lungo la direzione di massima pendenza. Il valore letto sul dinamometro rappresenta la forza di rottura.



Figura 58 Telaio per l'individuazione del piano debole



Figura 59 Telaio durente l'esecuzione di una prova

# 4.4 Analisi profilo stratigrafico

Allo scopo di acquisire le proprietà che contraddistinguono il manto nevoso, è stata eseguita l'analisi stratigrafica determinando il profilo in funzione della profondità. Tramite questi profili è possibile rilevare non solo la presenza di strati deboli, ma anche informazioni sul clima invernale individuando la quantità di neve caduta oppure gli effetti dei gradienti termici sul manto. Sono stati eseguiti diversi campionamenti con una profondità di 50 cm. Dall'analisi non sono stati riscontrati strati deboli responsabili della rottura per taglio. Si riporta in allegato il profilo del manto nevoso ricavato usando il modello fornito dall'*Aineva*. Emergono i seguenti parametri:

• *La temperatura* viene espressa in gradi Celsius. Si nota come la temperatura del manto nevoso rilevata a contatto con il terreno sia praticamente prossima allo zero per diminuire con legge lineare all'aumentare dell'altezza.

Si osserva che, nelle condizioni di prova, la temperatura dell'aria è maggiore della temperatura della neve in superficie perché l'area di campionamento è situata in una zona coperta non soggetta alla radiazione solare, in questo caso il contributo energetico per irraggiamento (dovuto ai raggi UV) è nullo, mentre esiste uno scambio termico sotto forma di calore (radiazione infrarossa) tra atmosfera e manto nevoso. In questo caso il calore disperso dalla superficie nevosa è maggiore di quello ricevuto, per questo la temperatura superficiale del manto è minore rispetto l'aria circostante.

La temperatura inoltre ha un'influenza sulle proprietà meccaniche della neve infatti: i) la durezza della neve aumenta al diminuire della temperatura, che tuttavia causa un aumento di fragilità ii) temperatura e il gradiente termico all'interno del manto regolano il metamorfismo della neve che ha influenza esso stesso sulla resistenza.

*Contenuto d'acqua (θ<sub>w</sub>):* Si intende la quantità di acqua presente nella neve allo stato liquido. Questo parametro è sinonimo di contenuto d'acqua libera in un campione di neve: l'acqua liquida presente nella neve deriva da fusione, pioggia o una combinazione dei due fenomeni. Ci sono cinque gradi per identificare il quantitativo di acqua all'interno

del manto nevoso: i) *asciutta* se il contenuto d'acqua è pari allo 0% ii) *umida*, se è minore del 3% iii) *bagnata* se varia tra il 3% e 8% iv) *molto bagnata* se varia tra  $8 \div 15\%$  v) *fradicia* se il contenuto d'acqua è maggiore del 15%.

- La forma dei grani è indicata come FF. Si usa la classificazione ICSI. Si sono ritrovate due tipologie di forme dei grani: per i primi 30 cm dalla superficie si trovano cristalli sfaccettate aventi forme miste (classe di neve 4c) sinonimo di forti gradienti termici all'interno del manto nevoso con neve prevalentemente asciutta. In profondità troviamo delle colonne di brina di fondo (classe 5b) la cui forma è quella di cristalli cavi disposti in catene; essi si formano in neve asciutta in seguito a una riorganizzazione dei cristalli in catene intergranulari, in questo processo di ricristallizzazione si formano dei legami laterali tra le colonne; questa neve è caratterizzata dall'essere molto fragile e con una bassa coesione. Si nota la presenza di impurità a 20 cm dal terreno tuttavia. In generale il provino è apparso molto granulare e non compatto per cui in alcuni casi si è verificata il crollo parziale del provino prima che questo fosse effettivamente campionato.
- *E* indica la *dimensione dei grani* classificati mediante l'uso di una piastrina millimetrata (dimensioni in mm). La dimensione dei grani di un deposito nevoso è la media delle dimensioni dei suoi grani.
- La durezza R esprime la resistenza alla penetrazione di un oggetto nella neve misurata con il test della mano. Il test si serve di oggetti con superficie decrescente che sono inseriti nel manto nevoso. Per ogni singolo strato del manto, lo stadio di durezza corrisponde al primo oggetto che si riesce a spingere delicatamente nella neve. In tabella sono elencate le 6 classi di durezza.
- *La densità* è determinata prelevando e pesando un campione di neve di noto volume, essa viene stimata tramite un tubo di carotaggio. Talvolta vengono misurate a parte la densità totale e a densità della neve asciutta. La densità totale tiene conto di tutte e fasi presenti (ghiaccio, acqua liquida e aria), mentre la densità della neve asciutta si riferisce unicamente alla matrice di ghiaccio e all'aria.

Test della mano	R	Area cm <sup>2</sup>	Durezza kNm <sup>-2</sup>
Pugno	1	82	1,5
4 dita	2	22,5	5,6
1 dito	3	5	25
Matita	4	0,04	195
Coltello	5	0,15	833
Ghiaccio	6		-

Figura 60 Classi di durezza del manto nevoso

# 4.5 Esecuzione della prova

Si descrive nel paragrafo seguente la procedura operativa per l'esecuzione del test tramite apparecchiatura di taglio.

- Scavo. Tramite una pala è stata eseguito uno scavo per una profondità di 50 cm.
- *Campionamento*. Il carotatore metallico insieme alla cazzuola americana è adoperato per estrarre il campione selezionato, in seguito è trasportato con l'ausilio di una tavola di legno a base larga, la cui altezza è pari a quella delle lamelle della macchina di taglio, alla postazione della apparecchiatura.
- *Preparazione del provino,* si procede con la preparazione del campione, esso viene trasportato alla base del versante dove è posizionata la macchina di taglio. Dopodiché si posiziona il campionatore metallico con la tavola di legno sul piano di lavoro. Questa operazione deve essere svolta in maniera accurata, infatti bruschi movimenti potrebbero danneggiare il campione di neve irreparabilmente prima della prova. I provini che presentano scarsa adesione sono stati compattati tramite la pala.
- *Preparazione della prova*. Si libera il provino di neve dal carotatore che lo contiene e si posiziona l'apparecchiatura sul campione di neve di dimensioni 160 mm x 160 mm x 76 mm. Anche questa operazione viene svolta con cautela per evitare un'alterazione del provino. Con l'utilizzo del coltello inferiore si chiude il cassetto inferiore. Si procede con l'inizializzazione di tutti i parametri di prova tramite il programma LabView.
- *Applicazione della pressione normale*. Operazione svolta tramite pompa manuale: si sono utilizzate diverse pressioni di confinamento per studiare la variazione della risposta dei provini.
- *Avvio della prova* con il programma labVIEW e applicazione della deformazione al provino. Con il programma labVIEW vengono definiti i parametri di prova (i.e. velocità, corsa, potenza erogata). Bisogna assicurarsi che lo stelo metallico sia a contatto con il pistone e di azzerare tutti i parametri della prova. Inoltre bisogna assicurarsi che il gancio che fissa il carrello superiore sia sbloccato. Per avviare la sequenza impostata occorre premere il comando di avvio *run*.
- Alla fine della prova con il comando *return* si fa rientrare dentro il motore lo stelo metallico. Si procede con il comando *end test* per far terminare la prova.
- *Estrazione* della macchina dal provino e osservazione del risultato della prova



Figura 61 Fasi di campionamento ed estrazione del provino

Questa descritta precedentemente è stata una nuova tipologia di campionamento scelta appositamente per le prove a Sestiere. Nella campagna di prove svolta a Gressoney- La Trinite si immetteva la macchina di taglio, previo scavo e preparazione del piano d'appoggio tramite l'uso di barre, direttamente nel manto nevoso. Questa procedura, seppur corretta, richiede un notevole impego di tempo per la preparazione della prova. In questa nuova procedura non è più necessario movimentare l'intera apparecchiatura dal momento che è il provino stesso a venire preparato e trasportato nell'area predisposta all'esecuzione del test. Infatti la scatola di taglio, pur essendo maneggevole, richiede un certo sforzo per essere sollevata. Nella fase di campionamento, usando questa nuova procedura risulta vantaggiosa perché si ha una maggiore velocità di esecuzione del test con la possibilità di eseguirne un maggior numero, non essendo necessario eseguire lo scavo prima dell'estrazione di ogni provino, la prova risulta velocemente riproducibile; tuttavia è possibile che qualche campione sia distrutto nel passaggio dal campionatore alla apparecchiatura di taglio

Sono state eseguite un totale di 10 prove di cui 7 ritenute valide, le prove iniziali sono servite a controllare il corretto funzionamento della macchina. Le prove sono state svolte a diversi valori di pressione normale e con due diverse velocità per studiare l'influenza del taglio sul campione. Nelle prove eseguite a bassa velocità non si è riscontrata una superficie di taglio netta, ma si è riscontrata la deformazione per effetto della compressione laterale del provino (fig 62); solo per valori di velocità pari a 100 mm/min si è verificata la parziale rottura a taglio. Concordemente a quanto asserito nello studio condotto da McClung, secondo il quale si verifica la rottura della neve per taglio se sono verificati due criteri i) la velocita di applicazione dell'azione tagliante supera un determinato valore, tale limite è definito come *velocità critica* ii) la sollecitazione da taglio deve essere uguale alla resistenza nel piano debole.


Figura 62 provino di neve dopo l'esecuzione del test

Un altro problema riscontrato è stato la mancata aderenza della piastra zigrinata che presentava rotazioni rispetto al provino.

Da precedenti analisi si nota come la rottura di taglio si sviluppi in genere quando è presente un piano debole, responsabile della formazione delle valanghe a lastroni. Lo strato debole può essere localizzato all'interno del manto nevoso oppure all'interfaccia tra questo e il terreno. Esso è caratterizzato da particolare microstruttura da parametri meccanici inferiori rispetto a quelle del manto nevoso adiacente.

Si è quindi proceduto a creare artificialmente uno strato debole tramite l'utilizzo della cazzuola americana formando così una superficie di discontinuità. Anche in questo caso, però, si è riscontrato che il meccanismo prevalente di rottura è stato per compressione laterale della neve. Nel paragrafo che segue verranno esposte le condizioni che devono essere soddisfatte nelle prove affinché avvenga la rottura per taglio

## 4.6 Perché avviene il taglio? Uno sguardo a un modello FEM

Per analizzare gli aspetti concettuali della rottura per taglio, è stato creato un modello FEM utilizzando il codice RS2 prodotto da Rocscience. Questo codice permette di elaborare dei modelli per lo studio di vari problemi legati alla meccanica delle terre quali la stabilizzazione di fronti di scavo alle opere geotecniche in profondità.

Il modello del provino viene rappresentato avente base di 16 cm e altezza di 7,6 cm e viene studiato in condizione di deformazione piana, non sono presenti quindi deformazioni fuori dal piano. Sono state ipotizzate numerose modellazioni del problema in esame, in modo da elaborare un modello efficace che sia quindi il più rappresentativo della realtà ma anche facilmente realizzabile.

Si considera due elementi: il primo costituito da un unico strato di neve, in cui si è adottata una legge costitutiva elastica-lineare, con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, dove i parametri di picco assumono il medesimo valore dei parametri residui. Il secondo materiale è la discontinuità che è stata creata artificialmente nel materiale per mezzo di una cazzuola, tale scelta è stata fatta

per riprodurre la presenza di uno strato debole, ovvero uno dei possibili piani che causa l'innesco di una valanga, cioè una fascia di materiale le cui caratteristiche meccaniche fossero inferiori al provino stesso. Per simulare questo strato di debolezza, sono state assegnate gli stessi parametri di resistenza (angolo di attrito e coesione) della neve circostante, mentre sono stati ridotti di un ordine di grandezza i parametri deformativi (modulo di elasticità e coefficiente di Poisson).

La prima operazione necessaria, utilizzando un modello agli elementi finiti, è quella di definire le condizioni al contorno rappresentative di quelle in cui avviene realmente la prova:

- pressione normale nota in corrispondenza del bordo superiore;
- spostamenti orizzontali nulli lungo i bordi verticali del dominio per simulare la presenza delle pareti della scatola di taglio (introduzione di vincoli a carrello);
- spostamenti orizzontali nulli lungo il bordo orizzontale inferiore (introduzione di vincoli a carrello);
- spostamenti orizzontali e verticali nulli in corrispondenza dei vertici inferiori del modello (introduzione di vincoli a cerniera);
- Campo di forze noto per simulare il movimento del carrello per effetto del motore passopasso.

Riguardo quest'ultima condizione al contorno sono state fatte due tipi di analisi: la prima in cui la forza è interamente applicata alla metà superiore laterale del provino, la seconda in cui la forza è trasmessa sia dalla parete verticale sia dalla piastra zigrinata dell'apparecchiatura. I valori dei carichi applicati vengono dedotti dai risultati delle prove svolte a Sestriere (tab 4). Si sono svolte diverse simulazioni per trovare la situazione più rappresentativa del caso reale. Per un esempio più approfondito di questa interpretazione, si veda il paragrafo 4.7.1.2, dove viene ipotizzata una rottura per mobilitazione di spinta passiva. La pressione normale è quella applicata dalla membrana in lattice al campione che vale 4 kPa.

La discretizzazione del dominio, anche detta mesh, avviene mediante l'introduzione di elementi finiti triangolari a tre nodi, avendo cura di garantire un adeguato grado di infittimento in corrispondenza della mezzeria.

Nel programma il risultato viene mostrato sotto forma di una grafica a colori. Per evidenziare le variazioni delle grandezze la scala utilizzata varia da freddo a caldo, dove i colori freddi identificano i valori minimi quelli caldi i valori massimi. Si rappresenta l'andamento delle tensioni i)  $\sigma_1$ , che identifica rispettivamente la massima tensione principale nel piano ii)il campo di spostamenti iii) deformazione di taglio iv) direzioni delle tensioni principali  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , che identificano rispettivamente la massima tensioni principali nel piano



Figura 63 Tensione massima principale  $\sigma_1$ 



Figura 64 Vettori degli spostamenti totali



#### Figura 65 Deformazione y

Nella prova in esame il meccanismo che crea la rottura a taglio è il seguente: il telaio mosso a velocità costante dal motore passo-passo, imprime uno spostamento al provino di neve, il bordo inferiore della scatola si oppone a questo spostamento. Imponendo lo scorrimento relativo dei piani di neve compresi tra le due parti meccaniche in moto relativo, si può notare che nella zona cerchiata di rosso in fig. 65 avviene una concentrazione si sforzi che causano la rottura a taglio la nascita di queste forze causa la nascita della superficie di discontinuità.

In figura 66 si evidenzia che all'interno della zona di debolezza le tensioni abbiano andamento a 45 gradi, cioè si verifica una situazione di taglio puro. Si nota che la nostra analisi è stata modellata usando un modello elastico-lineare, quindi non si ha la formazione di una superficie di discontinuità ma è possibile osservare i) zone in cui avviene una concentrazione di tensioni e ii) la deformata che assume il provino nell'ipotesi di piccoli spostamenti (fig. 64).



Figura 66 Direzione delle tensioni principali sul piano

A conclusione di questa analisi si ricorda della difficolta modellare il materiale neve: nel modello numerico non è stato possibile tener conto di parametri come il grado di sinterizzazione, il comportamento viscoso, la densità e l'influenza della temperatura sull'esecuzione del test. Effettuare diverse prove in condizioni iniziali diverse sicuramente comporta una maggiore comprensione di come questi aspetti influenzano l'esecuzione della prova.

## 4.7 Interpretazione delle prove

Si analizzano 7 prove svolte con una pressione variabile tra i 3 e i 6 kPa. A differenza delle prove eseguite in Giappone, il cui scopo era studiare l'interazione tra un blocco di malta e un provino di neve, nelle prove svolte a Sestriere si vuole provocare una rottura all'interno della neve, quindi la superficie di rottura non si verifica più tra neve-malta.

La neve, che è stata campionata, presenta una densità molto bassa. Se si rappresenta l'indice dei vuoti "*e*" come complemento a uno della frazione solida, che è il rapporto tra la densità della neve asciutta e la densità del ghiaccio, si nota che questo indice ha un valore molto elevato infatti:

$$e = 1 - \frac{\rho_{snow}}{\rho_{ice}} = 1 - \frac{280}{917} \cong 70 \%$$

Dove la densità  $\rho$  è espressa in  $kg/m^3$ 

Inoltre dall'analisi del profilo stratigrafico è emerso che i provini sono costituiti da grani aventi bassa coesione. Sia l'elevato numero di pori sia la bassa coesione favoriscono la rottura per compressione rispetto quella per taglio. Ciò significa che avviene una compattazione all'interno del provino piuttosto che la formazione di una superficie di discontinuità. Nell' osservazione dei provini a test completato, si osserva la deformazione del lato superiore del provino senza che si sia verificato il taglio non essendosi creata nessuna superficie di rottura.

La forza di taglio è la forza che viene trasmessa dalla parete verticale della scatola e dal cappuccio zigrinato. Non è chiaro in quale proporzione tale forza si distribuisca tra le due superfici, si può tuttavia ipotizzare che la forza venga trasmessa proporzionalmente alla superficie di contatto. Tramite il programma *Diadem*, che permette l'acquisizione e la visualizzazione dei dati, si sono fatte le seguenti osservazioni: si riporta, a titolo d'esempio, la prova delle h 11:42 (fig. 67).

Le tensioni di taglio presentano una serie di picchi senza la formazione del tratto residuo. Come detto precedentemente bisogna escludere un meccanismo di rottura di taglio poiché non c'è stata un moto relativo tra la metà superiore del campione e quella inferiore, ma avviene una compressione e una parziale rotazione del provino di neve. Il meccanismo che spiega la formazione dei picchi di forza è simile a quello descritto per le prove in Giappone: il superamento di una certa quota di forza affinché avvenga lo spostamento. Si nota che questi massimi hanno un trend crescente: ciò può essere provocato da un aumento di rigidezza che campione subisce durante la prova, a causa della compattazione impressa dalla macchina.



Figura 67 Prova h 11:42

Un'altra possibile interpretazione della presenza dei picchi potrebbe essere attribuita allo scorrimento cappello zigrinato: si immagina che quando avviene lo scorrimento, i grani in superficie ostacolano il movimento del cappuccio zigrinato e ciò comporterebbe l'insorgere dei picchi di forza; deve quindi essere raggiunto un livello soglia di forza che provoca una rottura parziale del provino in superficie; queste rotture sono confermate dal fatto che durante la prova si sono percepiti dei suoni sordi provenienti dalla macchina. Tali rumori sono stati associati a una rottura fragile del campione dovuta alla piastra zigrinata per poter proseguire la sua corsa. A conferma di ciò, a test concluso, è stato possibile osservare dei solchi generati dallo scorrimento del cappuccio sul provino di neve (fig. 68).



Figura 68 Provino di neve dopo l'esecuzione del test.

Un motivo per la mancanza di una rottura di taglio potrebbe essere dovuto alla lama inferiore. Essa infatti presenta una superficie liscia, su questa non possono crearsi tensioni di attrito. Infatti la rottura di taglio può essere facilitata dalla nascita di tensioni antimetriche ovvero quelle che il cappuccio superiore applica al campione e quelle generate per attrito dalla lama che hanno verso opposto. Un'alta causa del mancato taglio può essere dovuta all'estesa superficie necessaria a creare scorrimento, si genera il taglio perché la parete inferiore della scatola si oppone allo scorrimento del provino, per effetto di questa forza nasce la superficie di discontinuità che facilita la propagazione delle tensioni al volume rispetto quelle di taglio, da ciò deriva che maggiore è la lunghezza del provino minore è l'efficacia della trasmissione della forza attraverso i grani di neve. L'unica prova in cui è avvenuta parzialmente una rottura per taglio è stata la prova eseguita alle ore 11.58 (vedere allegati). In tale prova si è impostata la massima velocità di deformazione pari a v = 100 mm/min e una pressione di confinamento molto alta pari a 7.8 kPa. Il massimo taglio registrato in questa prova vale 34.5 daN. In tale prova non si assistono a una serie di picchi osservati nelle prove precedenti ma un andamento crescente della forza registrata dalla cella di carico durante l'esecuzione della prova.

Ore prova	Velocita [ <i>mm/min</i> ]	Pressione [kPa]	Massimo forza [N]
11:03	10	3.2	89.6
11:24	10	4.3	157.1
11:32	10	5.4	229.6
11.42	10	3.4	143.6
11:51	10	3.3	145.0
11:58	100	7.8	343.6
12:09	100	4.3	157.1

Tabella 4 elenco delle prove svolte a Sestriere

### 4.7.1 Una possibile causa di rottura: mobilitazione della spinta passiva

#### 4.7.1.1 Generalità

Nella meccanica delle terre le spinte del terreno si suddividono in verticali e orizzontali. Le spinte orizzontali sono legate alla spinta verticale da una relazione del tipo  $\sigma_h = K\sigma_v$ , dove K è il coefficiente di spinta. In particolare, le spinte statiche vengono distinte in: spinta a riposo, spinta attiva e spinta passiva. La *spinta a riposo* equivale a una pressione efficace orizzontale corrispondente a una situazione "naturale" dove K<sub>0</sub>, detto coefficiente di spinta a riposo, rappresenta il rapporto tra la pressione laterale efficace  $\sigma'_h$  e la pressione verticale efficace  $\sigma'_{v0}$ ; in particolare  $\sigma'_h = K_0 \sigma'_{v0}$ . La *spinta attiva* si presenta quando si verifica un'espansione laterale uniforme del materiale per le quali il coefficiente K si riduce da K<sub>0</sub> sino al valore limite K<sub>a</sub> (coefficiente di spinta attiva).

La *spinta passiva* rappresenta la reazione massima che il terreno può esercitare per effetto di una compressione orizzontale; il coefficiente di spinta passiva viene definito K<sub>p</sub>.





In particolare, dalla figura 69 si nota che a parità di pressione verticale OA ( $\sigma_1$ ), se si riduce progressivamente la tensione orizzontale mantenendo inalterata la tensione verticale, siccome il materiale ha resistenza al taglio limitata, sarà possibile diminuirla fino al raggiungimento di uno stato di equilibrio limite. Il segmento AC rappresenta una diminuzione della pressione laterale  $\sigma_3$ (spinta attiva).

Se invece il materiale vene sottoposto a una compressione uniforme, incrementando la tensione orizzontale, si raggiunge una nuova condizione di equilibrio limite. Il segmento AD rappresenta un incremento della pressione laterale  $\sigma_3$  (spinta passiva).

Inoltre l'analisi sui cerchi di Mohr permette di indentificare due famiglie di piani, sui quali la resistenza al taglio è interamente mobilitata: in particolare nel primo caso (spinta attiva) l'angolo di rottura è dato da  $45^{\circ}+\varphi/2$ , nel secondo (spinta passiva) da  $45^{\circ}-\varphi/2$ .

#### 4.7.1.2 Rottura per spinta passiva

L'apparecchiatura di taglio, per effetto del motore elettrico, imprime uno spostamento al provino. In questa situazione avviene una compressione della neve in cui è mobilitata la spinta passiva. Il massimo valore della tensione orizzontale (cioè quando il cerchio di Mohr è tangente all'inviluppo di rottura) vale:

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tag{1}$$

Dove: 
$$\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = K_p$$

Si può calcolare il valore dell'angolo di attrito  $\varphi$  conoscendo le tensioni orizzontali e verticali. Se il valore dell'angolo di attrito rientra nell'intervallo di valori ammissibili per la neve, allora si ipotizzerà un meccanismo di rottura equivalente alla mobilitazione della spinta passiva.

Dalla (1) si ottiene

$$2\left(\tan^{-1}\left(\sqrt{K_p}\right) - \frac{\pi}{4}\right) = \varphi$$

Con  $K_p = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ 

La pressione verticale è quella generata dalla membrana, la pressione orizzontale è la spinta esercitata dal cassetto mobile al campione. Conoscendo la forza di taglio risultante, registrata dalla cella di carico (prova h 11:24), si può ipotizzare che è trasmessa al campione in due zone: i) la superficie superiore corrispondente alla piastra zigrinata, ii) la semi-parete verticale superiore della scatola di taglio.

Si ipotizza che la forza sia trasmessa proporzionalmente alla lunghezza. Nel nostro caso:

- la lunghezza della superficie della piastra (L<sub>top</sub>) è di 16 cm;
- la lunghezza del semi-carello superiore (L<sub>vert</sub>) è di 4 cm per la parete verticale.

Quindi la lunghezza complessiva (Ltot) è di 20 cm.

$$F_{top} = \frac{16}{20} F_{tot} = \frac{4}{5} 150 = 120 N$$

$$F_{vert} = \frac{4}{20} F_{vert} = \frac{1}{5} 150 = 30 N$$

La pressione orizzontale  $\sigma_3$  agisce su un'area A pari alla altezza del carrello mobile (0.04 m) per la lunghezza di tale carrello (0.16 m). Quindi l'area sarà pari a 0.0064 m<sup>2</sup>. La spinta orizzontale è quindi pari al rapporto tra la forza verticale (F<sub>vert</sub>) e l'area (A) su cui agisce.

$$\sigma_{3} = \frac{F_{tot} \frac{1}{5}}{A} = \frac{150 \frac{1}{5}}{0.0064} = 4687.5 \, Pa = 4.7 \, kPa$$
$$\varphi = 2 \left[ \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{\sigma_{3}}{\sigma_{1}}} \right) - \frac{\pi}{4} \right]$$
$$\varphi = 2 \left[ \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{4.7}{3}} \right) - \frac{\pi}{4} \right] = 0.22 \, rad$$

2

Ovvero  $\varphi = 12.7^{\circ}$ 

Siccome questo risultato rientra nell'intervallo di valori di angolo di attrito ammissibili per la neve, il meccanismo di rottura per mobilitazione di spinta passiva può essere assunto valido.

## 4.8 Migliorie da apportare all'apparato di taglio

- Uno dei problemi riscontrati durante la campagna di prove a Sestiere è stata la difficolta
  nel mantenere la pressione normale a un valore costante. L'applicazione della pressione
  normale avviene tramite la camera d'aria gonfiata con la pompa manuale. A causa delle
  dissipazioni interne la pressione all'interno della membrana non è stabile. Si può risolvere
  questo problema tramite un dispositivo che controlli la pressione d'aria in ingresso.
- Durante l'esecuzione delle prove si è osservata un'inclinazione della piastra zigrinata. Si potrebbe risolvere questo problema usando un cappello di spessore maggiore oppure una diversa geometria della zigrinatura per valutare anche quale sia l'aliquota del taglio effettivamente trasmessa dalla piastra.
- La potenza erogata dalla batteria in alcuni casi non è stata sufficiente per il completamento della corsa del motore. Nella prova denominata "12:09", nonostante si fosse impostata un'intensità di 3000 *mA*, il motore non riusciva a procedere; in questo caso la massima forza registrata dalla cella di carico è stata di 30 *daN*. Si è supposto che le basse temperature possano aver influito sul corretto funzionamento del motore passo-passo. Una possibile soluzione è configurare il motore elettrico in modo tale che esso sia

costantemente in movimento, anche durante le pause che intercorrono tra una prova e l'altra. In tale modo si potrebbe evitare un eccessivo raffreddamento del motore.

- In molte delle prove che sono state effettuate a Sestriere si è notato una compressione invece che la rottura per taglio. Se il bordo inferiore, che nella configurazione attuale è costituito da una lamina metallica liscia, fosse sostituito con una superficie con scanalature, potrebbero nascere delle tensioni all'interfaccia di natura attritiva. Infatti la rottura di taglio può essere facilitata dalla nascita di tensioni antimetriche di verso opposto: quelle che la piastra zigrinata applica al campione e quelle generate per attrito dal fondo della scatola.
- Il materiale campionato presenta un'alta porosità e una bassa coesione che ha favorito la compattazione del provino piuttosto che la formazione di una superficie di taglio: nelle prove future si consiglia, prima di eseguire la prova, compattare i provini in modo tale da ottenere provini più omogenei possibili.

# Allegati

```
clear all
close all
clc
freq=100% frequenza campionamento
%%%%Prova 1
prova1=load('12.01.txt');
press_mia1=prova1(:,1);
forza_mi1=prova1(:,2);
forza mia1=(forza mi1-1.13).*10; %correggere valore F base!
i=0;
for k=1:length(forza mia1)
  if press_mia1(k)>1
    i=i+1;
    forza1(i)=forza_mia1(i);
    press1(i)=press_mia1(i);
  else
    break;
  end
end
```

Codice Matlab per l'interpretazione delle prove

```
%%%Prova 2
```

```
prova2=load('12.16.txt');
press_mia2=prova2(:,1);
forza_mi2=prova2(:,2);
forza_mia2=(forza_mi2-1.18).*10;
i=0
for k=1:length(forza_mia2)
    if press_mia2(k)>1
        i=i+1;
        forza2(i)=forza_mia2(i);
        press2(i)=press_mia2(i);
        else
            break;
        end
end
```

%%%Prova 3

```
prova3=load('12.28.txt');
press_mia3=prova3(:,1);
forza_mi3=prova3(:,2);
forza mia3=(forza mi3-1.11).*10;
i=0;
for k=1:length(forza mia3)
  if press_mia3(k)>1
    i=i+1;
    forza3(i)=forza_mia3(i);
    press3(i)=press_mia3(i);
  else
    break;
  end
end
%%%Prova 4
prova4=load('12.47.txt');
press_mia4=prova4(:,1);
forza_mi4=prova4(:,2);
forza_mia4=(forza_mi4-1.12).*10;
i=0;
for k=1:length(forza_mia4)
  if press mia4(k)>1
    i=i+1;
    forza4(i)=forza_mia4(i);
    press4(i)=press_mia4(i);
  else
    break;
  end
end
%%%Prova 5
prova5=load('12.53.txt');
press mia5=prova5(:,1);
forza_mi5=prova5(:,2);
forza mia5=(forza mi5-1.14).*10;
i=0;
for k=1:length(forza mia5)
  if press_mia5(k)>1
    i=i+1;
    forza5(i)=forza mia5(i);
    press5(i)=press mia5(i);
  else
    break;
  end
end
```

figure plot(press mia1,forza mia1),xlabel('press mia[kPa]'),ylabel('forza mia[N]'),title('curva di prove'); hold on plot(press mia2,forza mia2) hold on plot(press\_mia3,forza\_mia3) hold on plot(press\_mia4,forza\_mia4) hold on plot(press mia5,forza mia5) figure plot(press1,forza1),grid on ,xlabel('press mia[kPa]'),ylabel('forza mia[N]'),title('Curva sperimentali'); hold on plot(press2,forza2),grid on hold on plot(press3,forza3),grid on hold on plot(press4,forza4),grid on hold on plot(press5,forza5),grid on

press=[press1 press2 press3 press4 press5];
forza=[forza1 forza2 forza3 forza4 forza5];

p=polyfit(press',forza',1); x=linspace(0,12); y=polyval(p,x); figure plot(x,y),grid on ,xlabel('pressione p[kPa]'),ylabel('forza N [N]'),title('riferimento');

dispVSload=load('giappone disp load cell.txt');%DaN dispVSpress=load('giappone disp normal press.txt'); disp2=dispVSload(:,1)./1000; %espresso in metri! loadcell2=(dispVSload(:,2)).\*10; %N normalprex2=dispVSpress(:,2);

figure plot(disp2,normalprex2);

```
k=0.02045/0.0256;
for j=1:length(normalprex2);
```

```
u(j)=(2*disp2(j)*0.16);
s(j)=(k./(1-2*u(j)./0.16)).*normalprex2(j);
```

end

figure plot(disp2,s);

for j=1:length(normalprex2);

Tf(j)=0.0529\*k\*0.0256\*normalprex2(j)\*+13.726/1000; Tf(j)=Tf(j)'; T(j)=(loadcell2(j)./1000-Tf(j))/(0.0256\*(1-2\*u(j)/0.16));

end

Tmed=movmean(T,freq); smed=movmean(s,freq); figure plot(disp2,Tmed),grid on ,xlabel('\delta [mm]'),ylabel('\tau[kPa]'); figure plot(disp2,smed),grid on ,xlabel('\delta [mm]'),ylabel('\sigma[kPa]');

figure plot(smed,Tmed),grid on ,xlabel('\sigma[kPa]'),ylabel('\tau[kPa]');

disp\_mm =disp2.\*1000; time=[0.0005:0.0005:140];

figure cmap=colormap(jet(1000)); c = linspace(0,140,length(time)); subplot(1,2,1),scatter(disp\_mm,Tmed,5,c,'filled'),grid on ,xlabel('\delta[mm]'),ylabel('\tau[kPa]'); subplot(1,2,2),scatter(disp\_mm,smed,5,c,'filled'),grid on ,xlabel('\delta[mm]]'),ylabel('\sigma[kPa]'); c\_bar = colorbar; c\_bar.Label.String = 'Test time (s)'; c\_bar.Label.FontSize = 10;





Figura 70 prova del 22/02, h 07:07, HP-SS-T2



Figura 71 prova del 22/02, 07:27, HP-SS-T2



Figura 72 prova del 22/02, h 07:47, HP-SS-T2



Figura 73 prova del 21/02, h 03:45, MP-SS-T2



Figura 74 prova del 21/02, h 04:15, MP-SS-T2



Figura 75 Figura 21 prova del 21/02,h 04:38, MP-SS-T2



Figura 76 prova del 21/02, h 02:18, LP-SS-T2



Figura 77 prova del 21/02, h 02:51, LP-SS-T2



Figura 78 prova del 21/02, h 03:11, LP-SS-T2



Figura 79 prova del 22/02, h 03:17, HP-SS-T1



Figura 80 prova del 22/02, h 03:47, HP-SS-T1



Figura 81 prova del 22/02, h 04:01, HP-SS-T1



Figura 82 prova del 22/02, h 01:58, MP-SS-T1



Figura 83 PROVA DEL 22/02 02:21, MP-SS-T1



Figura 84 prova del 22/02/2019, h 02:47, MP-SS-T1



Figura 85 prova del 20/02, h 02:21 , LP-SS-T1



Figura 86 prova del 20/02, h 03:08, LP-SS-T1



Figura 87 prova del 20/02, h 04:09, LP-SS-T1



Figura 88 prova del 22/02, h 06:05, HP-SL-T2



Figura 89 prova del 22/02, h 06:22, HP-SL-T2



Figura 90 prova del 22/02, h 06:38, HP-SL-T2


Figura 91 prova del 21/02, h 07:19, MP-SL-T2



Figura 92 prova del 21/02, h 07:35, MP-SL-T2



Figura 93 prova del 21/02, h 07:46, MP-SL-T2



Figura 94 - prova del 21/02, h 06:28, LP-SL-T2



Figura 95 prova del 21/02, h 06:42, LP-SL-T2



Figura 96 prova del 21/02, h 06:54, LP-SL-T2



Figura 97 prova del 20/02, h 07:12, HP-SL-T1



Figura 98 prova del 20/02, h 07:57, HP-SL-T2



Figura 99 PROVA DEL 20/02, H 08:31, MP-SL-T1



Figura 100 prova del 20/02, h 08:53, MP-SL-T1



Figura 101 prova del 19/02, h 08:56, LP-LS-T1



Figura 102 prova del 19/02, h 09:15, LP-SL-T1



Figura 103 prova del 19/02, h 09:15, LP-LS-T1



Figura 104 descrizione del manto nevoso fornita dall'AINEVA

Attrezzi principali	Scatola di taglio
	Portatile con installato LabVIEW
	Motore passo-passo
	LVTD
	Cella di carico
	Termocoppie
	Piastra dentata in plastica
	Piastrina millimetrata e lente
	Cutter per campioni 16 cm x 16 cm x 8 cm
	Lama inferiore
	Regolatore aria per impostazione pressione normale
	Cavo USB per collegamento valigetta PC
	Batteria 24 V
Accessori	Cacciaviti, brugole, nastri adesivi e forbici
	Tavolo portatile
	Hard disk
	Quaderno e matite
	Card per classificazione della neve
	Batterie ricaricabili (12 pile)
	Colla per la membrana
	Tavola di legno





Figura 105 prova delle 11:03



Figura 106 prova delle 11:24



Figura 107 prova delle 11:32



Figura 108 prova delle 11:42



Figura 109 prova delle 11:51



Figura 110 prova delle 11:58



Figura 111 prova delle 12:09

## Bibliografia

[1] M. Barbero, F. Barpi, M. Borri Brunetto, and O. Pallara (2013). An apparatus for in-situ direct shear tests on snow. Politecnico di Torino.

[2] E.A. Podolskiy, M. Barbero, F. Barpi, G.Chambon, M. Borri Brunetto, O. Pallara, B, Frigo, B. Chiaiaadn M.Naaim. (2014). Healing of snow surface-to-surface contacts by isothermal sintering. The Cryosphere, 8, 1651–1659, 2014 <u>www.the-cryosphere.net/8/1651/2014/</u>

[3] Masaharu Fukue. (1978). Mechanical performance of snow under loading. Department of Civil Engineering & Applied mechanics. McGill University. National Library of Canada

[4] V.P. Singh, P. Singh, U.K. Haritashya. (2011). Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer ed.

[5] A.M. Kietzig, S. G. hatzikiriakos and P. Englezos. (2009). Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity. Journal of Applied Physics. The University of British Columbia, Vancouver

[6] B. Frigo, M.C. Prola M. Faletto. (2012). Valutazione della stabilità del manto nevoso: linee guida per la raccolta e l'interpretazione dei dati, Regione Autonoma Valle d'Aosta.

[7] D. M. Mcclung. (1977). Direct simple shear test on snow and their relation to slab avalanche formation. Journal of Glaciology, Vol. 19. No. 81, 1977. Norges Geotekniske Institutt.

[8] M. Mellor (1974). A review of basic snow mechanics

[9] G. Casati. (2019). Conoscere la neve. Scuola Silvio Saglio –CAI SEM corso di scialpinismo base 2019

[10] K.Platzer, P.Bartelt e M.Kern.(2007). Measurements of dense snow avalanche basal shear to normal stress ratios (S/N). Geophysical research letters, vol. 34

[11] Shapiro, L.H, Johnson, J.B., Sturm, M., and Blaisdell, G.L. "Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications." Tech. Rep. 97-3, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (1997).

[12]J. Schweizer, J.B. jamieson, Schneebeli. (2013). Snow avalanche formation. Reviews of Geophysics, 41.

[13] S. Cresseri, Constitutive modelling of dry granular snow at low strain rates, Dottorato di ricerca, Politecnico di Milano

[14] J. Schweizer. (1998). Laboratory experiments on shear failure of snow. Swiss Federal InstituteJor Snow and Avalanche Research, CH-7260 Davos Doif, Switzerland

[15]G. Casassa, H. Narita and Norikazu Maeno. (1990). Shear cell experiments of snow and ice friction. Journal of Applied Physics 69, 3745 (1991)

[16] G. Villa. (2012). Proprietà meccaniche della neve: aspetti sperimentali. Tesi specialistica. Politecnico di Torino.

[17] Ballard, G., Feldt, E., and Toth, S. (1965). Direct shear study on snow: procedures and data, volume Spec. Rep. 92. CRREL.

## Sitografia

[18]https://it.wikipedia.org/wiki/Neve

[19] Sistema classificazione del manto nevoso.http://www.sievr.it/neve/Sistema%20classificazione%20del%20manto%20nevoso.pdf. a cura del Gruppo Previsori AI*NEVA*