

INTERFERENZE VALANGHE CON LE COSTRUZIONI

INTRODUZIONE

Una delle attività principali di ricerca svolte nel sito sperimentale della P.ta Seehore è lo studio dell'interferenza tra valanghe e strutture, ambito di ricerca sperimentale attualissimo. L'analisi del comportamento del flusso nevoso durante l'impatto e la conseguente risposta di una struttura sono infatti essenziali ai fini della riduzione della vulnerabilità e del rischio in aree valanghive. A differenza degli altri siti sperimentali europei, l'attenzione in Valle d'Aosta è stata posta su valanghe di piccole/medie dimensioni che, ad oggi, risultano più frequenti e più interferenti con il normale svolgimento della vita quotidiana e turistica in montagna. Se però il fatto di dover tener chiusa una strada o una pista per problemi di rischio valanghivo può comportare disagi, l'eventuale interazione con strutture, soprattutto se abitate, mette a rischio l'incolumità delle persone. Ma cosa succede quando una valanga interferisce con una costruzione?

Quali sono le pressioni in gioco? A quali forze è sottoposta la struttura durante l'impatto? Come reagisce la struttura stessa all'impatto con la massa nevosa in movimento?

Proprio per rispondere a questi quesiti, nel sito sperimentale della P.ta Seehore, è stato ideato e messo in opera un bersaglio.

Grazie a forma e sensoristica appositamente studiate e progettate, l'ostacolo permette la misura delle forze valanghive in gioco e della sua risposta dinamica durante la fase di impatto, trasmesse in tempo reale alla sala computer e, in remoto, al Politecnico di Torino. A seguito dell'identificazione strutturale avvenuta nei laboratori del DISTR - Politecnico di Torino e allo sviluppo di modelli numerici, grazie alle misure effettuate alla P.ta Seehore, è possibile interpretare il comportamento della struttura e del flusso nevoso durante l'impatto, analizzandone la risposta al fine di comprendere le modalità con cui la valanga agisce sull'ostacolo. In questo articolo vengono descritte le fasi

concettuali, di realizzazione e funzionamento del sistema integrato per la rilevazione delle forze di impatto da valanghe di neve, realizzato all'interno del comprensorio Monterosa Ski (Fig. 1).

L'IDEAZIONE DELL'OSTACOLO

Dal punto di vista concettuale, il sistema di misura della forza di impatto valanghivo è stato ideato perseguendo esigenze dettate dal tipo di misure da effettuare, ma anche dall'ambiente estremo in cui si sarebbe andati ad operare, nel rispetto del paesaggio e dell'ambiente valdostano.

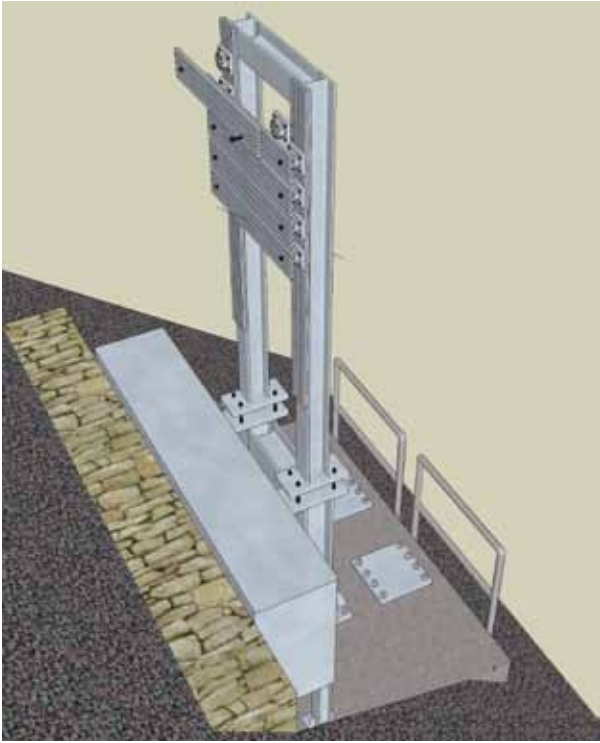
Alla base della progettazione del prototipo vi è anzitutto la necessità di riprodurre il più realisticamente possibile l'impatto del flusso nevoso su una parete di un edificio, accoppiata a requisiti tecnici di modularità, "elitransportabilità", rimovibilità ed economicità delle soluzioni, con l'impiego delle tecnologie disponibili.

Nella pagina a fianco, l'ostacolo strumentato al sito della P.ta Seehore.

ZA GHIVA

Misure e analisi
dell'impatto
valanghivo
sull'ostacolo
strumentato della
Punta Seehore





Dall'alto verso il basso: fig. 1 - Vista d'insieme dell'ostacolo impattato dal fenomeno valanghivo del 5 marzo 2011; fig. 2 - Rendering tridimensionale d'insieme del sistema integrato per la rilevazione delle forze di impatto da valanghe di neve al sito della P.ta Seehore.

Queste esigenze rispondono alla necessità di facilitare il montaggio del bersaglio in alta quota e di garantire una sua rapida manutenzione ordinaria (controllo dei collegamenti elettrici e dell'integrità strutturale) e straordinaria (come l'eventuale sostituzione di parti danneggiate e non più funzionali), l'eventuale smantellamento o, semplicemente, la rimozione durante la stagione estiva per ridurre l'impatto visivo. Inoltre, l'esigenza di modularità permette di pensare a future modifiche strutturali in termini di forma, altezza e dimensioni del pilone, al fine di saggiare differenti forme di ostacolo. La rimovibilità della struttura e del sistema di misura è stata inoltre appositamente studiata per poter riprodurre un'analoga campagna di monitoraggio in altri siti. Le necessità sopra descritte si sono concretizzate nella concezione di un bersaglio strutturalmente composto da una struttura di base, fissa, di sostegno alla parte in elevazione, smontabile, accompagnato da una sensoristica sperimentale, modulare,

per l'acquisizione ed alla infrastruttura per la trasmissione dati. Nella realtà è stato poi articolato con la realizzazione di (Fig. 2):

- una piattaforma in conglomerato cementizio armato, protetta a monte da gabbioni in materiale sciolto, posta a base di tutto l'impianto;
- un ostacolo rimovibile, in carpenteria metallica, destinato a essere investito dalla valanga e portatore degli strumenti di misura delle forze d'impatto;
- una struttura a protezione degli impianti di acquisizione e controllo elettronico della strumentazione, consistente in un armadio stagno protetto da una tettoia in carpenteria metallica;
- una condotta sotterranea per il collegamento elettrico e per la trasmissione dei dati tra la piattaforma strumentata e la sala computer di controllo situata a valle;
- un sistema di acquisizione e controllo, comandato via software in remoto e dalla sala di controllo localizzata nella stazione di arrivo della telecabina Staffal-Gabiet della Monterosa Ski.

LA PROGETTAZIONE DEL BERSAGLIO

Il sistema è costituito da una fondazione in conglomerato cementizio armato che costituisce anche la piattaforma sulla quale trovano posto (Fig. 2):

- un *ostacolo*, o *bersaglio*, costituito da un telaio realizzato con profili commerciali di tipo HEB in acciaio, alto 4.20 m, diviso in due parti: la parte inferiore ($h = 1.20$ m), collegata con dadi ai tirafondi annegati nella fondazione, e la parte superiore ($h = 2.80$ m) sulla quale trova posto la strumentazione (trasduttori di forza, estensimetri e accelerometri). Le parti sono collegate mediante una discontinuità strutturale (dispositivo a rottura prestabilita, $h = 0.20$ m) per la protezione della fondazione;
- un *armadio* stagno contenente i sistemi di alimentazione elettrica e di acquisizione dati;
- una *tettoia* in acciaio, con lo scopo di proteggere i suddetti sistemi. Progettata tenendo conto delle forze di scivolamento lento del manto nevoso, essa costituisce inoltre un piano di calpestio per rag-

giungere la parte superiore dell'ostacolo strumentato durante le operazioni di manutenzione.

Al fine della progettazione, in mancanza di fonti specifiche sull'entità delle forze sviluppate (oggetto dell'attività di ricerca), il valore dei carichi indotti dall'impatto sulla struttura deriva dallo studio della letteratura disponibile sull'argomento e da analisi numeriche opportunamente effettuate.

In particolare, è stato esaminato il sito francese del Col du Lautaret, simile in alcuni aspetti a quello in oggetto, dove le forze misurate su un ostacolo avente un'area di 1 m^2 sono dell'ordine di 35 kN (Thibert et al., 2008). Sono inoltre state effettuate analisi con il software AVAL-1D, sviluppato e commercializzato dall'Istituto Federale Svizzero per lo Studio della Neve e delle Valanghe (WSL-SLF) di Davos (Casetta, 2009) per verificare le pressioni valutate per confronto con il sito del Lautaret e per evidenziare i percorsi più probabili della valanga. Si è perciò assunta una forza di progetto di 50 kN agente sull'ostacolo a $2,50 \text{ m}$ dalla superficie del pendio con una inclinazione pari a quella del pendio stesso (cioè 35°).

Con lo scopo di proteggere la fondazione, per motivi di sicurezza, costi ed impossibilità di ripristino, è stato ideato un *dispositivo a rottura prestabilita* che, qualora la spinta della valanga tendesse a superare la forza di progetto, dovrà cedere in modo tale da non trasmettere alla fondazione sollecitazioni capaci di farle raggiungere lo stato limite ultimo. Tale dispositivo è stato progettato come una sezione indebolita di collegamento tra la parte superiore ed inferiore dell'ostacolo, realizzata mediante 4 bulloni, organizzati in due coppie con interasse $b = 276 \text{ mm}$ (Fig. 3). In ultimo, la fondazione è stata progettata come un plinto isolato di forma parallelepipedica, avente dimensioni in pianta quadrata ($3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$) e spessore 0.6 m .

Essa insiste su un piano orizzontale ricavato nel pendio ed è protetta a monte da gabbioni di materiale sciolto che assorbono e trasferiscono sul piano di posa le spinte orizzontali delle terre e della neve a monte. La scelta dei gabbioni è stata dettata da

scelte tipicamente ambientali con lo scopo di portare in sito la minor quantità di calcestruzzo possibile e utilizzare materiali facilmente reperibili in loco.

SENSORISTICA E SISTEMA DI TRASMISSIONE DATI

Parte integrante dell'ostacolo sono i sensori che permettono di misurare la variazione delle principali grandezze fisiche in gioco durante l'impatto valanghivo. Per quantificare l'azione esercitata dalla massa nevosa durante lo scorrimento, sul bersaglio della P.ta Seehore sono state installate quattro differenti tipologie di strumentazione che permettono di valutare, oltre alle forze esercitate dalla valanga, anche i movimenti dell'ostacolo, la temperatura del manto nevoso e la pressione dell'aria. Posto sull'ostacolo, il vero strumento di misura delle forze d'impatto generate dalle valanghe distaccate naturalmente o artificialmente dal pendio sovrastante, è la superficie d'impatto di area pari a circa 1 m^2 , tale da rappresentare una porzione significativa di una costruzione reale e, nel contempo, tale da permettere l'esercizio sicuro del sistema sotto i carichi previsti. Disposta in un piano verticale contenente la linea di massima pendenza, questa superficie d'impatto è costituita da cinque piastre nervate (traversi) di dimensioni $18 \times 111 \text{ cm}$, realizzati in lega di alluminio, disposte orizzontalmente e trasversalmente al flusso, con la funzione di intercettare la massa nevosa in movimento. Ciascuna piastra è fissata ad una coppia di celle di carico (Fig. 4) le quali, a loro volta, sono vincolate alla struttura metallica dell'ostacolo in maniera tale da poterne regolare la posizione in altezza, intercettando il flusso a diverse profondità (Fig. 5). In parallelo, per l'analisi della risposta dinamica del bersaglio, sono presenti quattro accelerometri che consentono di definire i movimenti dell'intera struttura. Tali dispositivi forniscono, infatti, i valori dell'accelerazione al piede ed alla cima della parte superiore dell'ostacolo. A corredo, posti a diverse altezze, vi sono quattro sensori per la misura della temperatura del manto nevoso e del flusso della valanga ed un sensore di controllo della

pressione atmosferica. Tutti questi sistemi di misura sono elettrici e funzionano convertendo la grandezza fisica in resistenza elettrica. Il cuore del sistema di acquisizione è perciò un dispositivo elettronico che alimenta elettricamente tutta la strumentazione e, in contemporanea, ne misura i valori del potenziale ai capi. Tali dati sono inizialmente memorizzati localmente, ed in seguito trasferiti mediante una rete in fibra ottica al centro di controllo situato in un locale della vicina stazione di arrivo della telecabina Staffal-Gabiet, distante circa 600 m dall'ostacolo. Nella sala controllo è presente un computer collegato, tramite un router telefonico GSM, alla rete Internet, mediante il quale è possibile seguire, da una qualsiasi postazione remota, tutte le operazioni in tempo reale e monitorare il funzionamento della strumentazione.

L'ANALISI E L'IDENTIFICAZIONE STRUTTURALE DELL'OSTACOLO

Allo scopo di prevedere la risposta dell'ostacolo strumentato alle azioni indotte dall'impatto della valanga e studiarne a ritroso la tipologia di carico, è stato implementato un modello matematico dettagliato del sistema. La tecnica di analisi scelta per la modellizzazione si basa sul metodo degli elementi finiti (Bathe, 1996; Zienkiewicz e Taylor, 2000) che consente di valutare la risposta della struttura alle più varie condizioni di sollecitazione, in campo statico e dinamico, considerando diversi tipi di comportamento del materiale. Seguendo questo approccio, l'ostacolo strumentato, completo di piastre d'impatto, è stato trattato come un insieme di corpi tridimensionali vincolati reciprocamente e verso la fondazione, in modo da riprodurre le reali condizioni di installazione. Fondamentale è stata la verifica del funzionamento del dispositivo a rottura, per effetto dell'applicazione di un carico orizzontale crescente lentamente, a partire dallo zero. Il materiale costituente i bulloni di collegamento tra le due parti dell'ostacolo è stato considerato dotato di un legame costitutivo elastico-idealmente plastico, con tensione di snervamento pari al valore nominale.

La risposta del dispositivo e della struttura (Fig. 6) è stata ottenuta con un'analisi passo passo, applicando il carico in piccoli incrementi, ricercando la soluzione ad ogni passo con un metodo iterativo del tipo Newton completo.

La relazione ottenuta tra il carico orizzontale, applicato alla quota di progetto, e lo spostamento relativo tra le parti superiore e inferiore dell'ostacolo presenta una risposta complessiva di transizione continua fra il comportamento elastico-lineare, ai bassi carichi, e quello plastico (deformazione a carico pressoché costante).

La risposta del bersaglio all'impatto della valanga darà luogo a segnali, misurati dai vari

*Sotto, dall'alto verso il basso:
fig. 3 - Particolare del dispositivo a rottura prestabilita a protezione della fondazione;
fig. 4 - L'ostacolo durante le operazioni di installazione in situ.
Si possono notare 4 coppie di celle di carico vincolate alla struttura in carpenteria dell'ostacolo e un traverso in lega di alluminio già montato.*



trasduttori, variabili rapidamente nel tempo e affetti dalla risposta elastica della struttura. Risulta perciò fondamentale conoscere la dinamica oscillatoria dell'ostacolo strumentato. È stata quindi condotta un'analisi dei modi di vibrare della struttura metallica, considerata incastrata alla base, completa di piastre d'impatto e delle masse aggiunte più significative (celle di carico e dispositivi di collegamento), ricavandone le frequenze dei primi modi di vibrazione (Fig. 7).

Fig. 5 - L'ostacolo a fine installazione in situ. Si possono notare i 5 traversi posti a differente altezza sull'ostacolo e l'uso della tettoia come piano di calpestio durante le operazioni di manutenzione.



Prove in laboratorio

Al fine di consolidare i risultati dei modelli matematici sul comportamento strutturale dell'ostacolo e verificarne il funzionamento del sistema di acquisizione dati prima dell'installazione in sito, la struttura è stata sottoposta a diverse prove sperimentali nel Laboratorio Materiali e Strutture (MASTR-LAB) del DISTR - Politecnico di Torino.

Le problematiche principali affrontate per lo svolgimento delle prove di laboratorio sono state il posizionamento del bersaglio e la riproduzione della sua fondazione.

La soluzione è stata il montaggio in posizione orizzontale dell'ostacolo accoppiato ad un telaio di contrasto in acciaio, opportunamente vincolato rigidamente con il pavimento del laboratorio grazie ad una struttura appositamente progettata e realizzata, costituita da una flangia saldata a due travi nervate HEB 220, collegate al pavimento con barre verticali filettate M39 (Fig. 8).

La campagna di prove effettuata ha previsto prove di caratterizzazione dell'ostacolo strumentato in campo statico e dinamico, volte a identificare con la maggiore precisione possibile i parametri meccanici e geometrici del modello matematico della struttura. Le prove statiche hanno avuto lo scopo di verificare la corrispondenza tra modalità di funzionamento della struttura previste con quelle effettivamente indotte dall'applicazione del carico.

È stato opportunamente verificato il comportamento del *dispositivo a rottura prestabilita* costituito dal collegamento bullonato tra le due parti dell'ostacolo.

Questo obiettivo è stato perseguito con l'applicazione di carichi quasi statici, applicati a diverse quote della struttura, crescenti lentamente fino a rottura. Il carico è stato applicato verticalmente grazie ad un sistema oleodinamico servocontrollato elettronicamente presente in laboratorio.

Le curve carico-spostamento registrate hanno fornito le informazioni richieste che sono state usate per calibrare la risposta del modello matematico agli elementi finiti. Per quanto riguarda invece il comportamento dinamico della struttura, sono state svolte due tipi di prove in laboratorio:

1. indagine sui modi propri di vibrare (analisi modale sperimentale), nel corso della quale, tramite un sistema di eccitazione e di registrazione delle accelerazioni in vari punti della struttura, si identificano le frequenze proprie e i corrispondenti modi di vibrare (Ewins, 2000);
2. studio della risposta del sistema a carichi variabili con rapidità, tali da simulare l'impatto della valanga sulla struttura in condizioni il più possibile prossime a quelle previste in situ (Goldsmith, 2001).

Le analisi statiche e dinamiche delle misure effettuate in laboratorio hanno consentito la calibrazione del modello matematico del bersaglio. A seguito di questa fase di affinamento, il modello è in grado di simulare più accuratamente le diverse situazioni possibili di impatto valanghivo reale e, di conseguenza, permette di interpretare le misure registrate in situ e gli effetti dinamici dell'interazione fra valanga e struttura.

MODELLO NUMERICO DI INTERAZIONE FLUSSO/OSTACOLO

Oltre alle analisi svolte in campo, l'interazione flusso valanghivo/struttura viene studiata da un punto di vista numerico. Ad oggi, i numerosi modelli di dinamica delle valanghe presenti in letteratura (Harbitz, 2008) non trattano direttamente dell'interazione con strutture. Da alcuni anni, presso il DISTR del Politecnico di Torino, si sta sviluppando un modello numerico con lo scopo di colmare questa lacuna. Sfruttando le equazioni di Navier-Stokes, classicamente utilizzate in fluidodinamica, il modello si basa sull'ipo-

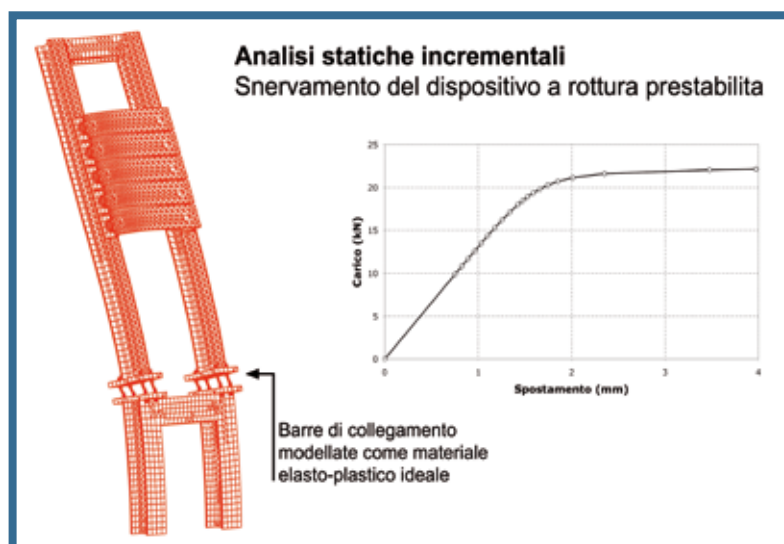


Fig. 6 - Analisi statica: deformata della struttura sotto carico (gli spostamenti sono stati amplificati per renderli visibili) con un esempio di risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche.

tesi di considerare la valanga come un fluido incompressibile, del quale si può decidere la reologia: newtoniano (con viscosità costante) oppure non newtoniano (con viscosità dipendente dal gradiente di velocità).

Nella sua versione più semplice il modello considera una situazione stazionaria e può essere di tipo bidimensionale (sia nel piano del pendio, sia nella sezione trasversale al flusso) o di tipo tridimensionale. Da un punto di vista operativo, si considera un dominio di calcolo, che comprende il flusso e l'ostacolo, nel quale, grazie ad un software agli elementi finiti, vengono risolte le equazioni di Navier-Stokes. Si impone, quindi, la velocità con la quale arriva il flusso valanghivo e si precisa se ci si trova in un versante o in un canale, definendo opportune condizioni al contorno. Svolgendo la simulazione, si ricavano in ogni punto del dominio i valori di velocità e di pressione.

Tali grandezze, indispensabili per il dimensionamento di una struttura, possono fornire informazioni preziose per l'analisi di ulteriori parametri, quali i coefficienti di forma e di pressione. In particolare, il coefficiente di forma C_d , che compare nella relazione che lega velocità e pressione, tiene conto della forma e delle dimensioni dell'ostacolo, mentre il coefficiente di pressione C_p , mostra invece come, sulle diverse parti di una struttura, si possano avere delle pressioni differenti in valore e segno. Grazie al modello sviluppato, è stato possibile verificare la dipendenza della pressione d'impatto dall'angolo di incidenza del flusso con l'ostacolo, nonché l'andamento delle linee di flusso intorno l'ostacolo, che, a seconda delle caratteristiche reologiche della valanga, mostrano la formazione di zone morte a valle o a monte dello stesso (rif. art. 5). Nella versione bidimensionale transitoria, si deve accoppiare al modello descritto in precedenza un'equazione di trasporto, implementata tramite una particolare tecnica numerica denominata del *level set*, che permette di cambiare nel tempo la forma della valanga. In questo modo, il modello ha il vantaggio di poter seguire l'evoluzione temporale della pressione di impatto.

La sua risoluzione nel piano trasversale permette di ottenere, oltre al profilo di velocità

(utile per la definizione della reologia della neve) e di pressione - informazioni già ricavabili in fase stazionaria - anche l'altezza del flusso e, nell'interazione con un ostacolo, l'altezza di risalita (Fig.9).

Si sottolinea come tale simulatore per poter essere utilizzato praticamente debba essere ancora ulteriormente validato e calibrato sulla base dei risultati sperimentali ottenuti. Applicato però a casi più generali, il modello

ha dimostrato la sua affidabilità confermando quanto presente in letteratura. Ad esempio, in termini di coefficienti di forma, il C_d di una forma quadrata viene correttamente calcolato come il doppio di quello di una forma circolare, e i $4/3$ di una forma triangolare, inoltre si mostra come il C_d decresca con la dimensione dell'ostacolo, confermando risultati sperimentali ricavati da altri centri di ricerca (Sovilla, 2008, Thibert et al., 2008).

Bibliografia

- Thibert E., Baroudi D., Limam A., Berthet-Rambaud P., 2008. Avalanches impact pressure on an instrumented structure". Cold Regions Science and Technology, vol. 54 (3), 206-215.
- Casetta A., 2009. Nuovo campo prove per lo studio delle valanghe di neve: analisi geotecnica e di dinamica della valanga. Tesi di laurea magistrale, I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino.
- Bathe K. J., 1996. Finite Elements Procedures. Prentice & Hall, Englewood Cliffs, USA.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., 2000. The Finite Element Method, 3 Vol., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- D.J. Ewins, 2000. Modal testing: theory, practice and application, 2nd ed., Research Studies, Baldock, UK.
- Goldsmith W., 2001. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids. Dover Publications, Mineola, USA.
- Harbitz C., 2008. A survey of computational models for snow avalanche motion. NGI Report 581220-1, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Sovilla B., Schaer M., Kern M., Bartelt P., 2008. Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Vallee de la Sionne test site. Journal of Geophysical Research, Earth-Surfaces, 113, F01010.

Fig. 7 - Analisi dinamica: deformate relative ai primi 3 modi propri di vibrazione e rispettive frequenze.

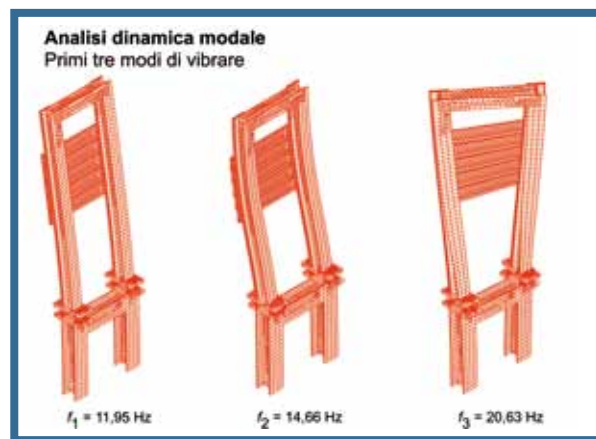


Fig. 8 - Installazione del bersaglio in laboratorio MASTRLAB del DISTR - Politecnico di Torino per le prove statiche e dinamiche. Si nota la riproduzione del vincolo della fondazione grazie ad un telaio di contrasto in acciaio, ancorato al pavimento.

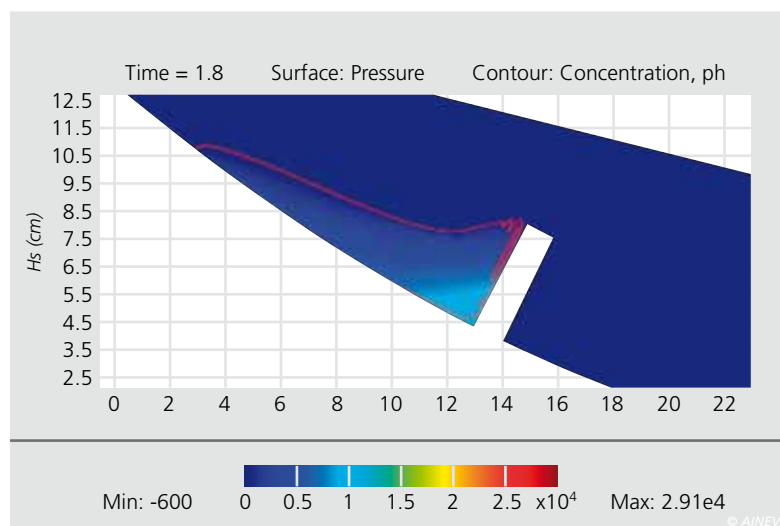


Fig. 9 - Simulazione numerica dell'interferenza valanghiva con il bersaglio di P.ta Seehore. Si notano le pressioni e l'altezza di risalita.