

## ANALISI DI SISTEMI DI PROTEZIONE DALLA CADUTA MASSI E DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO VALANGHIVO CON LA TECNICA DEGLI ELEMENTI FINITI

Massimo Raviglione <sup>(1)</sup> e Massimo Tomasi <sup>(2)</sup>

### INTRODUZIONE

Il presente articolo, riguarda l'analisi agli elementi finiti di strutture paramassi e fermaneve, atte a mitigare il rischio derivante da eventi di caduta massi e fenomeni valanghivi.

Le analisi effettuate, hanno permesso lo studio del comportamento delle strutture in campo dinamico ed in campo statico.

I risultati ottenuti, hanno consentito l'ottimizzazione dei singoli componenti (geometria e materiali), la valutazione degli effetti del carico sugli elementi strutturali sia nelle configurazioni standard, che nelle configurazioni diverse rispetto ai prototipi testati in scala reale, ed in ultimo lo sviluppo e l'analisi pre-test dei nuovi prodotti.

Gli studi e le analisi descritte, sono state effettuate con il codice di calcolo agli elementi finiti Ls-Dyna rel. 970 prodotto dalla LSTC - Livermore Software Technology Corporation, utilizzando il modulo esplicito. Si prevede per il futuro anche l'utilizzo del solutore implicito.

Il modulo *esplicito*, attualmente, è stato utilizzato per l'analisi strutturale di barriere soggette ad impatti di un singolo volume roccioso ad alta velocità tipico della caduta massi, o di più volumi rocciosi a media-bassa velocità tipico delle frane di disgregazione; il modulo *implicito* verrà utilizzato per l'analisi strutturale di barriere fermaneve a rete e di strutture di tipo attivo per il rivestimento di fronti rocciosi.

<sup>(1)</sup> ricercatore presso Incofil Srl – Pergine Valsugana (TN) - Italy

<sup>(2)</sup> EnginSoft Spa Firenze - Italy

## ANALISI DINAMICA STUDIO DELL'IMPATTO DI UN BLOCCO SU UNA BARRIERA PARAMASSI FLESSIBILE

Il presente studio riguarda l'analisi di una barriera flessibile studiata e realizzata al fine di superare i test di omologazione previsti dalla "direttiva per l'omologazione delle reti paramassi – WSL / UFAPP ed. 2001 e s.m.i." per il collaudo in vera grandezza della strutture paramassi flessibili a rete.

### CASO IN STUDIO

La barriera oggetto del presente studio è una barriera flessibile di classe 7 – energia 2.000 kJ con un'altezza d'intercettazione minima pari a 5,00 m e lunghezza del modulo funzionale pari a 10,00 m. La barriera è composta da struttura di sostegno in carpenteria metallica (montanti – profili aperti sezione HEB), struttura d'intercettazione in fune (schema d'intercettazione - pannelli di fune a nodi borchianti), struttura di collegamento (funi portanti e stralli – funi metalliche a trefolo) e struttura di dissipazione (sistemi frenanti ad asola).



Fig. 1 - Vista generale di una struttura paramassi flessibile a rete

### MODELLAZIONE, ANALISI E TARATURA DEL MODELLO

L'analisi ha permesso di verificare prima del collaudo in vera grandezza, la struttura nel suo insieme, in particolare, grazie alla simulazione agli elementi finiti, si è verificata la dissipazione energetica del sistema (globalmente e sui singoli componenti), la variazione dei carichi nel tempo per ogni parte fondamentale e in ultimo i valori dei carichi trasmessi ai componenti fondazionali (forze di compressione e taglio alla base del montante e forze di trazione agli ancoraggi della struttura di collegamento)

La modellazione 3D della barriera ha riprodotto fedelmente le reali condizioni geometrico-strutturali del prototipo reale, particolare attenzione è stata dedicata alla modellazione dei singoli componenti; in dettaglio, si è cercato di modellare limitando al minimo le semplificazioni le seguenti parti: la cerniera del montante (cerniera unidirezionale che permette la sola rotazione monte-valle del montante), il passaggio delle funi nella testa del montante e nella piastra di base, il pannello dello schermo d'intercettazione e i sistemi frenanti.

In generale, per la modellazione dei componenti si sono utilizzati i seguenti elementi piani, lineari e a molla:

- componenti metallici per carpenteria, elementi piani tipo shell (fully-integrated-shell);
- funi, elementi lineari tipo beam (section-beam o hughes-liu);
- sistemi frenanti, elementi a molla tipo spring (section-discrete) per il dissipatore e elementi lineari tipo beam (spotweld-beam) per il componente che simula l'innesco del sistema frenante.

I materiali utilizzati, sono stati scelti fra quelli che, in generale, garantiscono il reale comportamento sperimentale dei singoli componenti. Per la carpenteria metallica e per le strutture in fune, sono stati adottati materiali che garantiscono un comportamento elastico a piccole deformazioni, passando ad un comportamento plastico al superamento dello snervamento, il modello matematico usato è mat-piecewise-linear-plasticity. Per i dissipatori sono stati utilizzati materiali elasto-plastici, in particolare, i componenti relativi al modulo di innesco sono stati modellati con mat\_spotweld\_damage\_failure. In fine per l'elemento frenante è stato utilizzato il materiale mat-spring-elastoplastic.

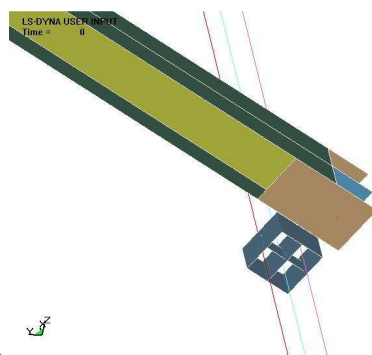


Fig. 2 - Particolare modellazione della base del montante

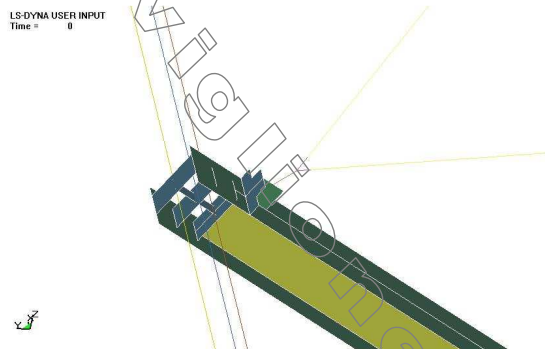


Fig. 3 - Particolare modellazione della testa del montante

Il comportamento della barriera durante l'impatto, come detto in precedenza, è stato simulato con un codice ad elementi finiti di tipo esplicito. L'obiettivo è quello di riprodurre il più fedelmente possibile le prove sperimentali al fine di valutare le variazioni di deformazione della struttura, l'andamento delle forze e la capacità dissipativa del sistema.

Il software utilizzato è LS-DYNA, un codice agli elementi finiti general-purpose particolarmente adatto ad analizzare strutture 3D sottoposte a fenomeni di dinamica veloce altamente non lineari. Il codice si basa su di un solutore con integrazione temporale di tipo esplicito che risolve le equazioni del moto basandosi su metodo delle differenze centrali modificato.

La scelta di simulare il fenomeno in studio con LS-DYNA è vincolata dal problema stesso in quanto la reale tempistica dell'impatto si esaurisce in un tempo dell'ordine dei decimi di secondo e presenta in modo evidente non linearità elevate quali grandi spostamenti, non linearità geometriche, non linearità di contatto e di materiali.

Le condizioni operative dell'analisi, in particolare la posizione d'impatto, la forma, il peso del corpo di lancio e la velocità d'impatto, sono state dedotte dalla direttiva elvetica<sup>(3)</sup> predetta, in particolare:

*prova preliminare b) con energia al 50% (campo di rete intermedio)*

- impatto in posizione centrale nel campo di rete intermedio rif. Fig. 8<sup>(3)</sup> "Disposizione delle reti di protezione sul campo di collaudo. Angolo dei singoli componenti";
- velocità d'impatto minima 25 m/s;
- forma del corpo di lancio, cubo a spigoli smussati rif. Fig. 10<sup>(3)</sup> "forma e geometria del corpo di lancio in calcestruzzo armato";
- dimensione (spigolo  $s = 1,11$  m) e massa (3.200 kg) del corpo di lancio rif. Tab. 2<sup>(3)</sup> "Indicazioni su parametri delle prove b) e c)";

*prova principale c) con energia al 100% (campo di rete intermedio)*

- impatto in posizione centrale nel campo di rete intermedio rif. Fig. 8<sup>(3)</sup> "Disposizione delle reti di protezione sul campo di collaudo. Angolo dei singoli componenti";
- velocità d'impatto minima 25 m/s;
- forma del corpo di lancio, cubo a spigoli smussati rif. Fig. 10<sup>(3)</sup> "forma e geometria del corpo di lancio in calcestruzzo armato";
- dimensione (spigolo  $s = 1,40$  m) e massa (6.400 kg) del corpo di lancio rif. Tab. 2<sup>(3)</sup> "Indicazioni su parametri delle prove b) e c)";

I risultati ottenuti dall'analisi pre-omologazione in campo prove, sono stati tarati in funzione dei risultati sperimentali accumulati in decine di test di omologazione presso il campo federale di Walenstadt (CH) e dai relativi report di omologazioni redatti dall'ente certificatore WSL.

<sup>(3)</sup> Direttiva per l'omologazione delle reti paramassi – WSL / UFAPP ed. 2001 e s.m.i.

## VALIDAZIONE DEL MODELLO

A seguito dell'effettuazione dei test di omologazione del prototipo effettuati il 13/05/05 - prova b) energia al 50% e il 19/05/05 - prova c) energia al 100% che hanno permesso il rilascio della certificazione WSL numero S05-10 del 19/05/2006 si è potuto validare l'analisi, sia come modello 3D sia come tipologia dei materiali utilizzati.

Gli schemi e le tabelle seguenti illustrano il confronto fra i risultati ottenuti con l'analisi agli elementi finiti e le misurazioni effettuate sul campo prove di Whalenstadt (CH).



Fig. 4 - Viste del prototipo pre-test installato nel campo prove di Whalenstadt (CH)

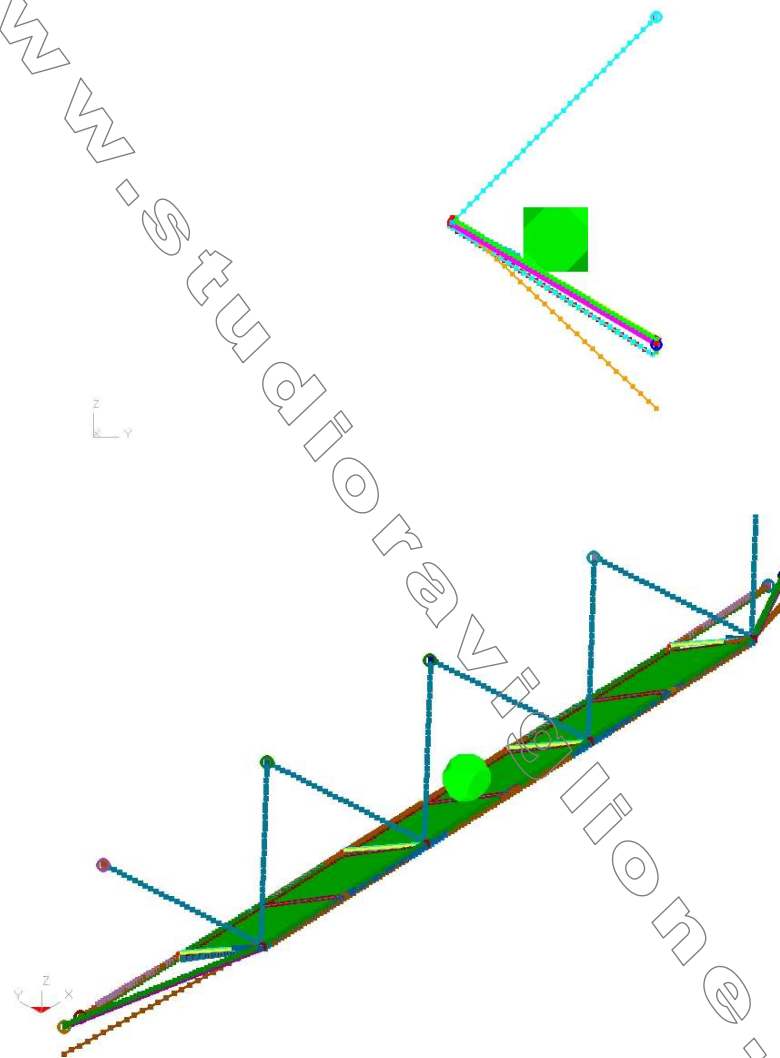


Fig. 5 - Viste del modello oggetto della simulazione

**Prova preliminare b) con energia al 50% (campo di rete intermedio)**

Confronto fra simulazione e test in scala 1:1 del 13/05/05

**Deformazioni del sistema**

Energia d'impatto [kJ]		Tempo d'arresto [sec]		Deformata [m]	
simulazione	test	simulazione	test	simulazione	test
999,51	1.000,00	0,3125	0,3400	4,184	5,100

Tab. 1 - Deformazioni del sistema Prova preliminare b) con energia al 50%

**Scorrimento dissipatori**

Componente	Scorrimento simulazione [m]	Scorrimento test [m]
Controvento di monte 03	0,00	0,05
Controvento di monte 04	0,00	0,00
Controvento di monte 05	0,07	0,00
Controvento di monte 06	0,01	0,25
Portante superiore laterale dx 15	0,42	0,20
Portante superiore schermo dx 18	0,85	1,45
Portante superiore schermo centrale 16	0,00	0,00
Portante superiore schermo sx 19	0,74	1,15
Portante superiore laterale sx 17	0,35	0,95
Portante inferiore laterale dx 22	0,36	0,10
Portante inferiore schermo dx 20	0,95	1,75
Portante inferiore schermo centrale 23	0,00	0,00
Portante inferiore schermo sx 21	0,86	1,55
Portante inferiore laterale sx 24	0,26	0,15

Tab. 2 – Scorrimento dissipatori Prova preliminare b) con energia al 50%

**Carichi su ancoraggi**

Componente	Carico simulazione [kN]	Carico test [kN]
Carico ancoraggio laterale superiore	337,77	315,00
Carico ancoraggio laterale inferiore	289,68	260,00
Carico ancoraggio controvento di monte	100,00	91,00

Tab. 3 – Carichi su ancoraggi Prova preliminare b) con energia al 50%



Fig. 6 - Viste del prototipo post-test installato nel campo prove di Whalenstadt (CH)

LS-DYNA USER INPUT  
Time = 0.3125



LS-DYNA USER INPUT  
Time = 0.3125

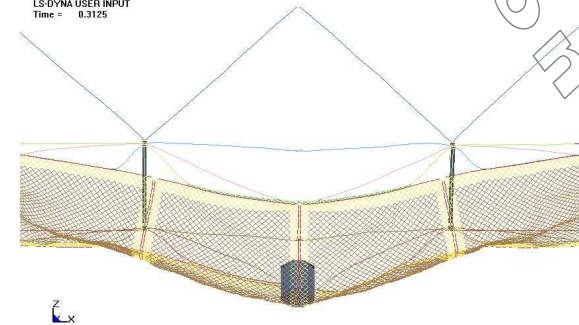


Fig. 7 - Viste del risultato della simulazione al tempo 0,3125 sec

Prova preliminare c) con energia al 100% (campo di rete intermedio)

Confronto fra simulazione e test in scala 1:1 del 19/05/05

Deformazioni del sistema

Energia d'impatto [kJ]		Tempo d'arresto [sec]		Deformata [m]		Altezza residua [m]	
simulazione	test	simulazione	test	simulazione	test	simulazione	test
2.000,20	2.000,00	0,3425	0,4600	5,050	6,800	2,874	2,630

Tab. 4 – Deformazioni del sistema Prova preliminare c) con energia al 100%

Scorrimento dissipatori

Componente	Scorrimento simulazione [m]	Scorrimento test [m]
Controvento di monte 03	0,00	0,65
Controvento di monte 04	0,00	0,45
Controvento di monte 05	0,06	1,25
Controvento di monte 06	0,66	0,35
Portante superiore laterale dx 15	1,23	1,20
Portante superiore schermo dx 18	2,49	2,60
Portante superiore schermo centrale 16	0,69	0,00
Portante superiore schermo sx 19	2,36	1,70
Portante superiore laterale sx 17	1,21	1,20
Portante inferiore laterale dx 22	0,26	1,00
Portante inferiore schermo dx 20	0,69	2,60
Portante inferiore schermo centrale 23	0,00	0,00
Portante inferiore schermo sx 21	0,64	2,60
Portante inferiore laterale sx 24	0,29	0,45

Tab. 5 – Scorrimento dissipatori Prova preliminare c) con energia al 100%

Carichi su ancoraggi

Componente	Carico simulazione [kN]	Carico test [kN]
Carico ancoraggio laterale superiore	363,80	350,00
Carico ancoraggio laterale inferiore	287,70	255,00
Carico ancoraggio controvento di monte	105,00	117,00

Tab. 6 – Carichi su ancoraggi Prova preliminare c) con energia al 100%

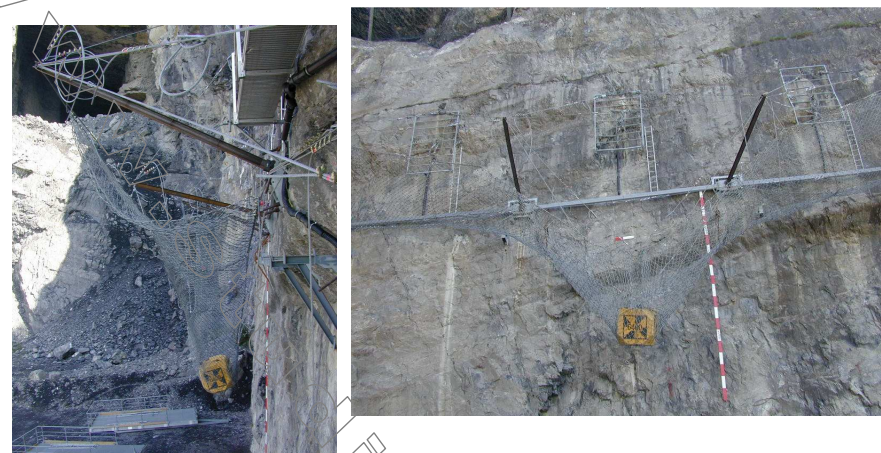


Fig. 8 - Viste del prototipo post-test, installato nel campo prove di Whalenstadt (CH)

LS-DYNA USER INPUT  
Time = 0.3425

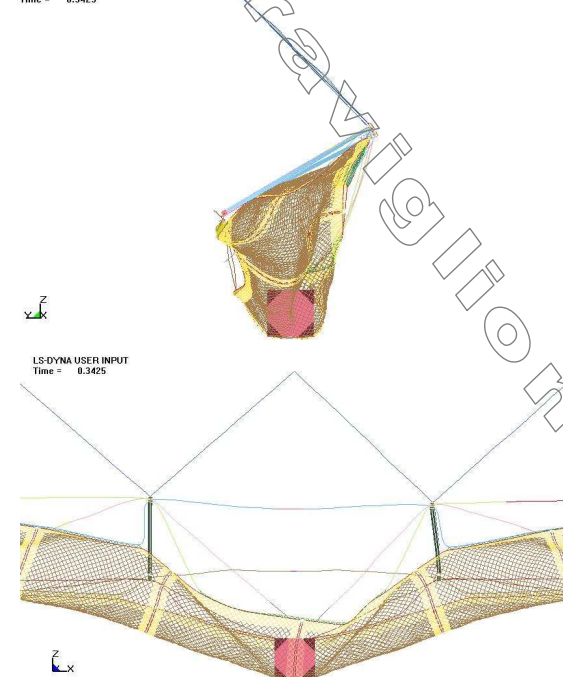


Fig. 9 - Viste del risultato della simulazione al tempo 0,3425

## SVILUPPI DEL CASO IN STUDIO E APPLICAZIONI PARTICOLARI

La taratura del modello con il confronto fra la simulazione e la realtà sperimentale, ha permesso di potenziare il sistema al fine di studiare nuovi prototipi non che studiare l'effetto di impatti ad energia superiore.

In particolare gli studi successivi, si sono concentrati sull'analisi di impatti ad energia superiore ed in punti non contemplati dalla norma di riferimento <sup>(3)</sup> (es. pannello laterale o montante).

Nel seguito si riporta in sintesi, l'esito dei predetti studi, in particolare:

- gli effetti deformativi generali relativi ad una simulazione con impatto di 3.000 kJ in posizione centrata nello schermo centrale, sulla struttura precedentemente studiata con schermo d'intercettazione in anelli concatenati;
- gli effetti deformativi generali relativi ad una simulazione con impatto in corrispondenza del montante del pannello centrale, sulla struttura precedentemente studiata con schermo d'intercettazione in anelli concatenati.

<sup>(3)</sup> Direttiva per l'omologazione delle reti paramassi – WSL / UFAP ed. 2001 e s.m.i

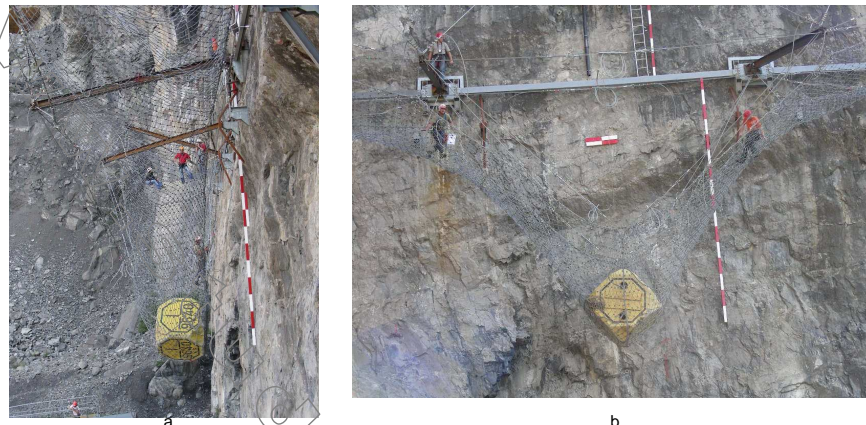


Fig. 10 - Viste del prototipo post-test installato nel campo prove di Walenstadt (CH)

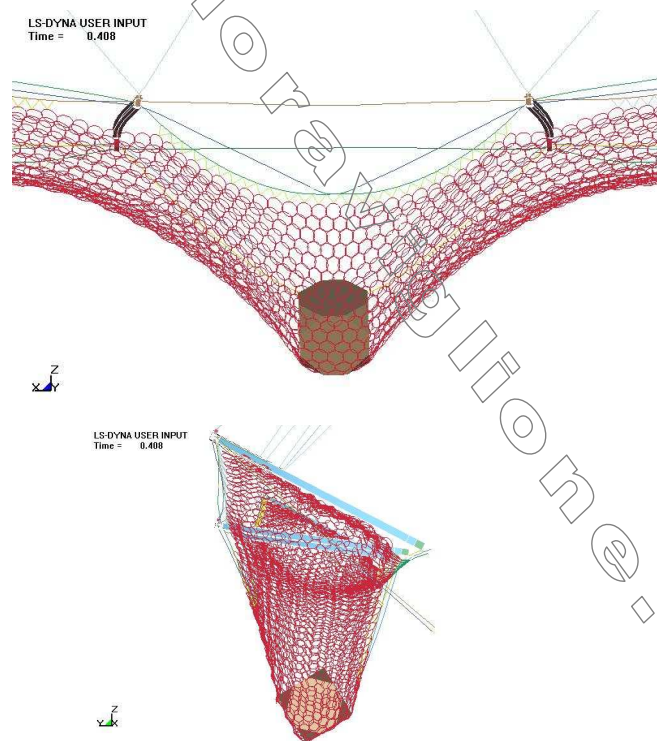


Fig. 11 - Viste del risultato della simulazione al tempo 0,408 sec



LS-DYNA USER INPUT  
Time = 0.255

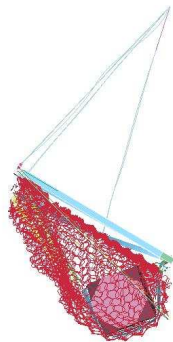
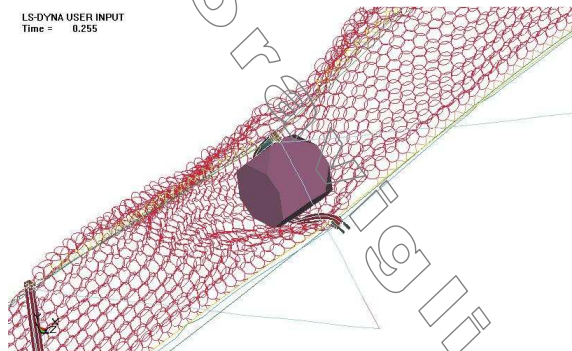


Fig. 12 - Vista dell'effetto dell'impatto di un blocco su un montante e simulazione

LS-DYNA USER INPUT  
Time = 0.255



LS-DYNA USER INPUT  
Time = 0.129

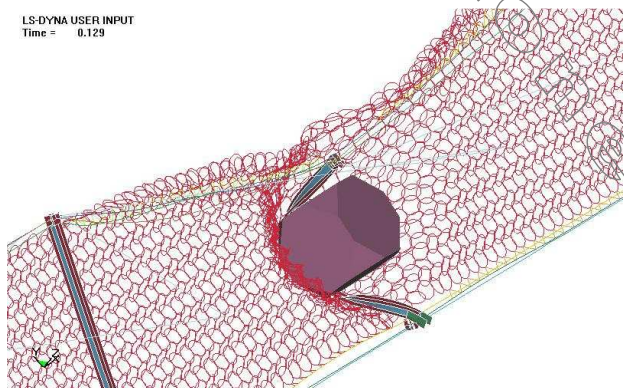


Fig. 13 - Viste del risultato della simulazione al tempo 0,255 sec

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Direttiva per l'omologazione delle reti paramassi – WSL / UFAPP ed. 2001 e s.m.i;
- Certificato prova di omologazione WSL numero S05-10 del 19/05/2006
- Verbale e report di test WSL / EKLS 05-10 50% per gentile concessione della società Isofer AG Knonau (CH);
- Verbale e report di test WSL / EKLS 05-10 100% per gentile concessione della società Isofer AG Knonau (CH);
- Schema dimensionale e di posizionamento strutture di fondazione campo prove di Walenstadt (CH) per gentile concessione della società Isofer AG Knonau (CH);