

## Il ruolo della Temperatura nell'evoluzione tenso-deformativa di un versante roccioso alpino: modellazione termo-meccanica della frana di Cimaganda

Autori: [Andrea Morcioni](#), Tiziana Apuani, Francesco Cecinato

Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio", Università degli Studi di Milano, Via Mangiagalli, 34, 20133, Milano, Italy

In contesto alpino le frane in roccia e le deformazioni profonde di versante rappresentano fenomeni di grande impatto ambientale e sociale. In questo studio i ricercatori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università Statale di Milano hanno valutato attraverso un'analisi numerica termo-meccanica, gli effetti delle variazioni di temperatura atmosferica sullo stato tensionale e sulla risposta deformativa dei versanti rocciosi.

### Perché uno studio sul ruolo della Temperatura nell'evoluzione tenso-deformativa dei versanti

Nonostante il ruolo della temperatura nelle dinamiche di versante sia ampiamente riconosciuto (fenomeni di gelo e disgelo, contrazione e dilatazione termica, fusione del permafrost ecc.), l'effetto degli sforzi termo-indotti sullo stato tenso-deformativo dei versanti viene generalmente trascurato nei modelli numerici di simulazione dell'evoluzione passata e previsionale. Nello studio pubblicato sulla rivista *Rock Mechanics & Rock Engineering* [1], viene proposto un approccio di calcolo numerico termo-meccanico applicato al versante di Cimaganda in Val Sangiacomo (SO), che mostra le cicatrici di una grande paleo-frana che nel 900 coinvolse ben 7.5 milioni di metri cubi di roccia (figura 1) e sviluppato con l'ausilio del codice [UDEC](#) (Universal Distinct Element Code - Itasca).

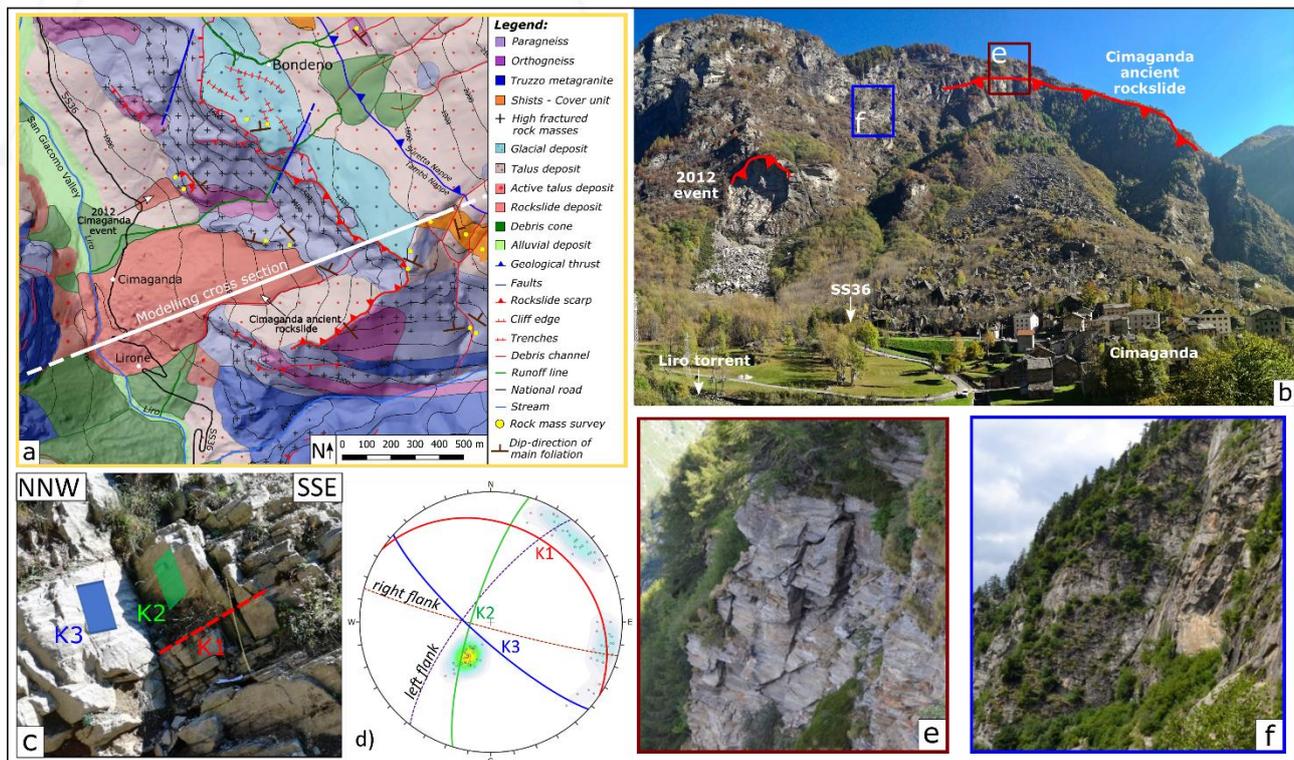


Figura 1 – Caratteristiche geomorfologiche e geomeccaniche del versante di Cimaganda.

Con l'obiettivo di elaborare un modello geologico-concettuale rappresentativo del versante in esame, l'analisi numerica è stata preceduta da una fase di rilevamento geomorfologico e geomeccanico, che ha messo in luce i peculiari caratteri di elevata instabilità del versante, con elementi tipici di fenomeni di rilascio tensionale a grande scala (figura 1). Prove di laboratorio sono state inoltre eseguite per valutare le proprietà meccaniche di matrice rocciosa e giunti, evidenziando un forte grado di alterazione del materiale affiorante.

### **La modellazione termo-meccanica della frana di Cimaganda**

Sulla base di quanto rilevato è stato elaborato un modello geomeccanico 2D agli elementi distinti (DEM) utilizzando il codice di calcolo UDEC7. Nell'approccio numerico adottato, il versante è modellato come un insieme di blocchi deformabili, individuati dall'intersezione di un sistema di discontinuità costruito coerentemente alle evidenze di campo (figura 2). Poligoni di Voronoi sono stati inoltre introdotti nella porzione più superficiale del versante per consentire la simulazione del processo di propagazione delle fratture. I set di discontinuità sono stati modellati come elementi a comportamento elasto-plastico, mentre ai blocchi è stata assegnata una legge di comportamento di tipo termo-elastico.

Partendo dalle condizioni relative all'ultimo massimo glaciale tardo-pleistocenico (LGM), l'approccio di analisi adottato ha previsto una prima fase in cui viene esaminato l'effetto meccanico del detensionamento glaciale, riducendo progressivamente il carico risultante dallo spessore di ghiaccio agente sul versante (figura 2a). In una seconda fase esso viene accoppiato agli effetti termici dovuti alla graduale esposizione del versante alla temperatura media atmosferica, che, a sua volta, subisce un progressivo incremento durante la deglaciazione, sino al raggiungimento di una stabilizzazione termica in età Olocenica (figura 2b). La distribuzione della temperatura lungo il versante è stata simulata esternamente al codice e successivamente importata nel modello per ciascun punto della griglia di calcolo. Con un approccio termo-meccanico semi-accoppiato, sono stati dunque valutati gli effetti indotti dalle variazioni termiche sul campo di sforzi e conseguentemente le deformazioni indotte all'equilibrio termo-meccanico, per ciascuno dei momenti salienti della storia climatica e tenso-deformativa del versante.

In una terza fase dell'analisi, gli effetti delle oscillazioni atmosferiche stagionali sono stati esaminati, sovrapponendo una funzione sinusoidale all'andamento di lungo termine della temperatura (figura 2c).

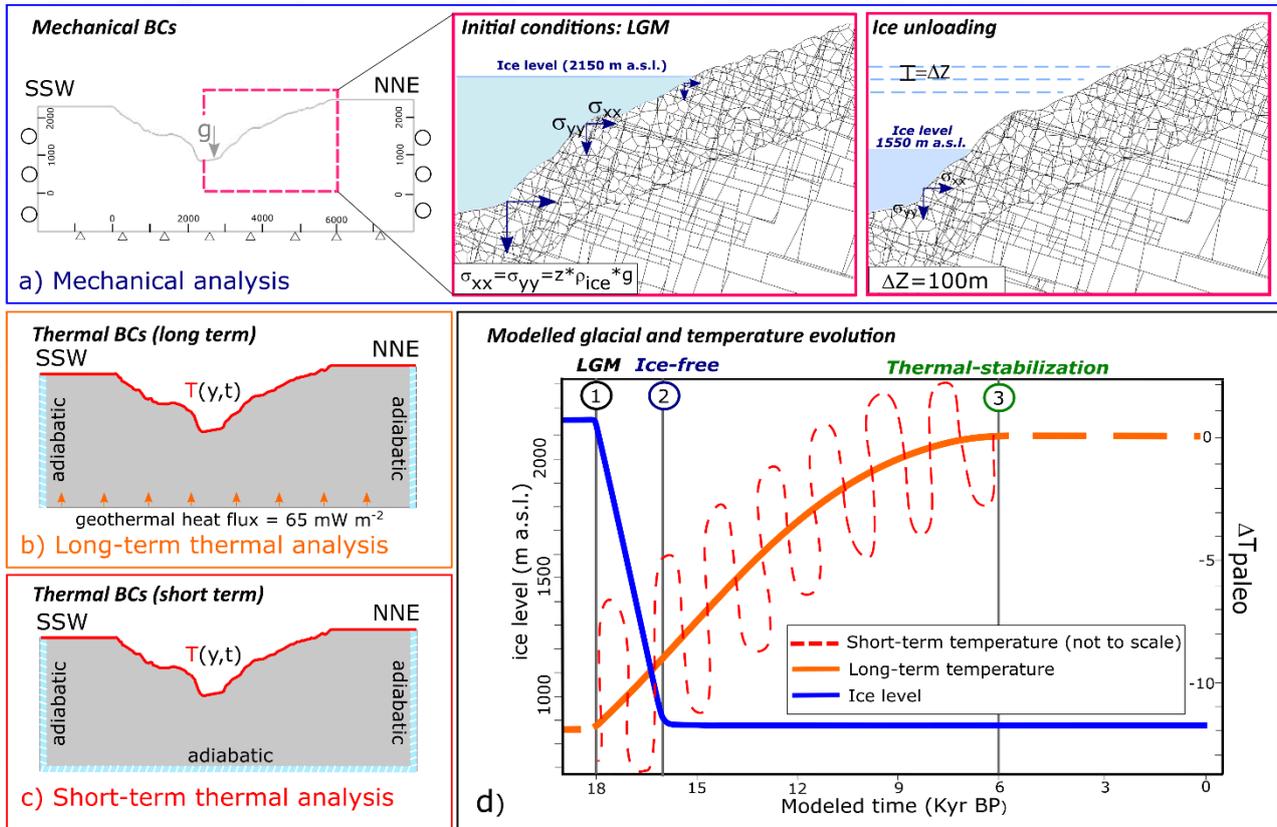


Figura 2 - Geometria del modello e condizioni al contorno.

## I risultati dello studio

I risultati hanno evidenziato come la riduzione del carico glaciale con un modello puramente meccanico, provoca un generale detensionamento degli ammassi rocciosi con deformazioni massime che si concentrano alla base del versante. Lo sviluppo e la propagazione di rotture e danneggiamenti di elementi di discontinuità è tuttavia limitato e non sufficiente a riprodurre l'instabilità rilevata lungo il versante. La successiva introduzione del fattore termico ha determinato un marcato incremento del campo deformativo sia per entità che per distribuzione, con rotture per taglio e trazione degli elementi di discontinuità presenti. Le deformazioni coinvolgono progressivamente il versante a quote maggiori e si approfondiscono aumentando il volume di influenza delle sollecitazioni indotte.

Il raggiungimento delle condizioni di plasticità viene ulteriormente accentuato quando il fattore termico di breve termine (che rappresenta le oscillazioni stagionali della temperatura dell'aria) è introdotto, a causa della continua contrazione e dilatazione volumetrica del materiale roccioso. I risultati mostrano come l'estensione dell'ammasso roccioso instabile aumenti sensibilmente, estendendosi ulteriormente verso la sommità del pendio (figura 3). Nuove rotture si verificano principalmente lungo la superficie del pendio, rappresentato da (i) rotture per trazione di elementi di discontinuità che rappresentano i lati dei blocchi direttamente interessati dalle variazioni volumetriche termo-indotte, e (ii) rotture di taglio lungo i giunti sub-verticali, promosse dalla propagazione delle tensioni termo-indotte con la profondità. Lo sviluppo di una zona profonda in cui si concentrano sforzi e deformazioni di taglio è inoltre coerente con le evidenze storiche della Paleofrana di Cimiganda.

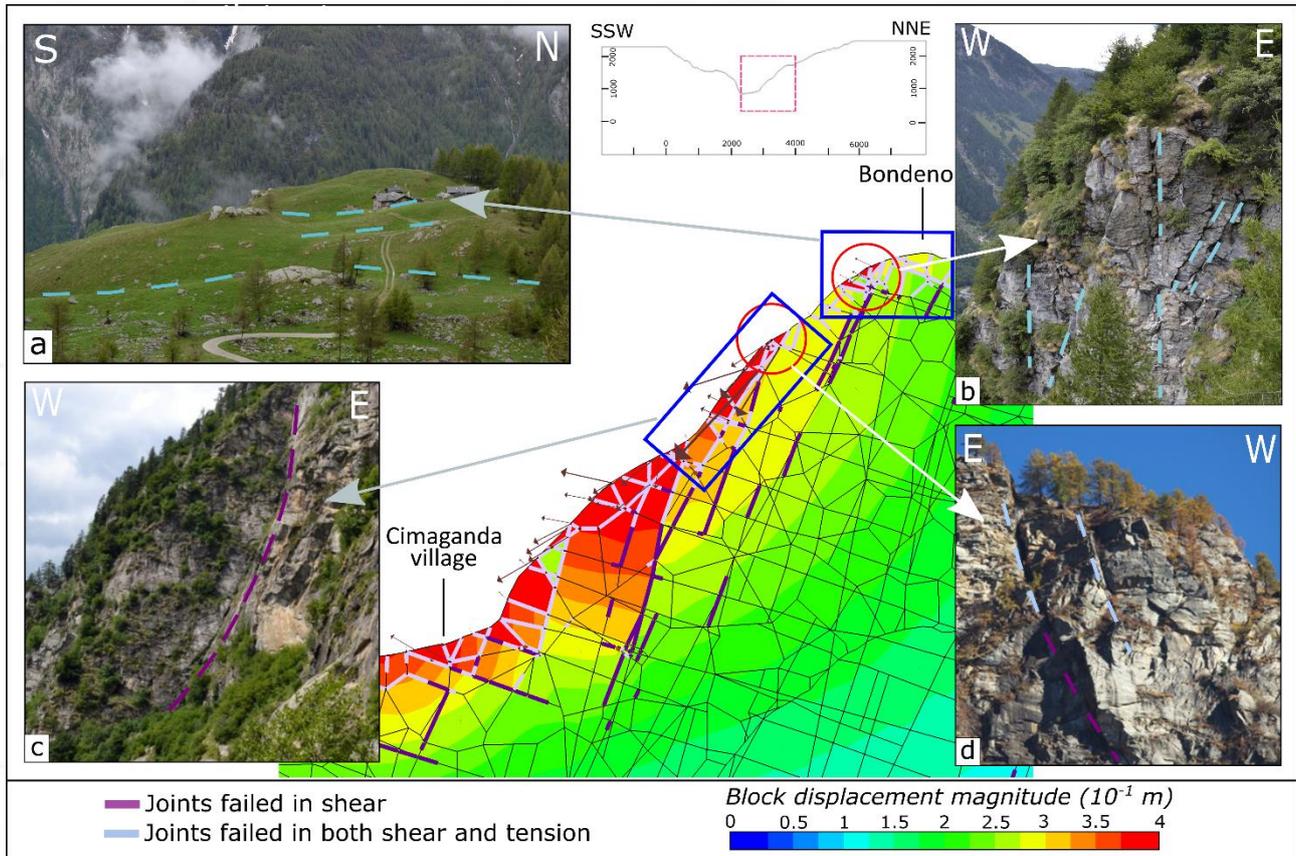


Figura 3 - Spostamenti totali e distribuzione delle rotture per taglio e trazione simulate al termine dell'analisi TM. I risultati rispecchiano lo stato degli ammassi rocciosi affioranti lungo il pendio.

L'incremento nel danneggiamento apportato dalla temperatura evidenzia come l'evoluzione dei versanti alpini sia fortemente condizionato dalle dinamiche climatiche. Variazioni termiche di lungo e breve termine possono contribuire significativamente alla propagazione di rotture e plasticizzazioni all'interno dei versanti, nonché promuovere la redistribuzione di deformazioni e sforzi di taglio, rappresentando un importante fattore preparatorio alle instabilità gravitative. Tali evidenze supportano le conoscenze sull'influenza dei fattori climatici nell'evoluzione dei versanti alpini e rappresentano un elemento fondamentale per l'analisi degli scenari di evoluzione futura in relazione ai cambiamenti climatici in atto.

Approfondimenti sono disponibili nella pubblicazione Open Access al seguente link:

[1] Morcioni, A., Apuani, T. & Cecinato, F. The Role of Temperature in the Stress–Strain Evolution of Alpine Rock-Slopes: Thermo-Mechanical Modelling of the Cimiganda Rockslide. *Rock Mech Rock Eng* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02786-y>

Ringraziamenti:

Si ringrazia la società Harpaceas per aver fornito il software Udec; un ringraziamento particolare va allo staff del supporto tecnico.