

## Documento di approfondimento 7

Nuovi aspetti della sismicità indotta dall'iniezione di fluidi, trattati in varie pubblicazioni del 2020,

1) Nella Sezione Speciale su “Osservazioni, Meccanismi e Rischi di Sismicità Indotta” del Bulletin of the Seismological Society of America, diversi contributi illustrano il rapido progresso della conoscenza scientifica e l'attuale stato dell'arte della comprensione dei terremoti indotti e innescati, della modellazione di eventi, della stima di pericoli e rischi e della prevenzione di danni a persone e ambiente.

Questo stato dell'arte dovrebbe essere lo standard per gli studi di impatto ambientale; la realtà, tuttavia, è lontana da questa evidente necessità. Se gli attuali standard scientifici fossero stati applicati agli studi d'impatto dei progetti di Pohang e Strasburgo, sarebbero stati evitati gravi danni. Se questi standard fossero applicati ai progetti attualmente in corso di valutazione d'impatto, si potrebbero prevedere ed evitare eventi catastrofici.

Nell'[introduzione a questa sezione speciale](#), Wang et al. riassumono la rapida evoluzione negli ultimi anni nell'acquisizione di osservazioni innovative, nello sviluppo di sofisticati modelli basati sulla fisica, nella comprensione dei meccanismi di triggering fisico e nello sviluppo di metodologie di previsione per migliorare le valutazioni di rischio e pericolo. Sottolineano che, mentre i modelli fisici di sismicità indotta hanno raggiunto un alto livello di sofisticazione per interpretare le osservazioni, per stabilire i meccanismi causali o prevedere il rischio futuro, esistono tipicamente poche misurazioni dirette delle proprietà idrogeologiche o meccaniche, come della in situ permeabilità del serbatoio o del basamento, della evoluzione nel tempo della pressione fondo pozzo, dell'estensione e delle caratteristiche della zona danneggiata della faglia. Anche la collaborazione tra l'industria e il mondo accademico dovrebbe ancora essere migliorata. Un'altra sfida importante è di trovare il modo migliore per incorporare le raccomandazioni scientifiche in stime accurate dei rischi a breve e lungo termine, e di creare normative equilibrate per ridurre il rischio.

Menzioniamo in particolare:

- [D. Szfranski e B. Duan](#). Esplorazione dei collegamenti fisici tra iniezione di fluidi e terremoti nelle vicinanze: il 2012  $M_w$  4.8 Timpson, Texas, caso di studio:

Gli autori integrano, in un nuovo approccio, un modello di flusso di fluidi in 3d mezzi porosi e deformabili con un modello sismico dinamico di rottura in una 3d matrice geologica eterogenea. Questo metodo consente di andare oltre le analisi del potenziale di cedimento di una faglia e di esaminare quanto può essere grande un terremoto quando una parte di una faglia raggiunge il punto di cedimento a causa dell'iniezione di fluido.

Gli autori applicano questo metodo al terremoto del 2012, di  $M_w = 4.8$  di Timpson. Le perturbazioni della pressione di poro e dello stress provocati dall'iniezione di acque reflue al momento della scossa principale risultanti dalla simulazione sono sufficientemente elevate (diversi MPa) da innescare un terremoto. La modellazione dinamica della rottura riproduce le principali osservazioni dell'evento, comprese la sua grandezza, il meccanismo focale e la sequenza delle scosse di assestamento. Riproducendo le caratteristiche principali della sequenza delle scosse di assestamento, si dimostra che il metodo ha il potenziale per diventare uno strumento predittivo per la progettazione dell'iniezione di fluidi.

- [G.M. Atkinson](#): L'intensità dei movimenti del suolo da terremoti indotti con implicazioni per il potenziale di danno:

L'autore confronta il potenziale di danno dei terremoti indotti con quello degli eventi tettonici naturali, considerando dati strumentali recenti e osservazioni della percezione di eventi di  $M_w = 3.5-5.8$ . I movimenti del suolo sono reciprocamente coerenti a distanze ravvicinate ( $<30$  km) per i terremoti naturali in California, i terremoti indotti in Oklahoma e i terremoti indotti nel Canada occidentale, nonostante le differenze nei processi dominanti che innescano gli eventi. I movimenti di picco del suolo registrati possono superare la soglia di danno per eventi indotti di  $M \sim 4.0$  entro  $\sim 5$  km dall'ipocentro; si presume che gli eventi di  $M > 4,5$  abbiano un potenziale di danno significativo entro 5 km e possano essere dannosi a distanze maggiori.

- [R. Schultz et al.](#): Raccomandazioni basate su valutazioni di rischio per la gestione della sismicità indotta da fratturazione idraulica tramite protocolli a semaforo:

I rischi da terremoti indotti causati dalla fratturazione idraulica sono una preoccupazione crescente, e necessitano di una gestione efficace. Gli autori sviluppano una strategia di valutazione del rischio per la scelta delle soglie dei semafori rossi e gialli sulla base dell'attuale comprensione dei terremoti indotti. Per fare ciò, utilizzano magnitudo probabilistiche massime, relazioni tra magnitudo e movimento del suolo, densità di popolazione, distribuzioni statistiche dell'amplificazione del sito e soglie di movimento del suolo percepite o dannose per calcolare il rischio di danno o fastidio. Le curve di rischio per vari scenari previsionali evidenziano due linee guida proposte. In primo luogo, l'impostazione delle soglie di luce rossa entro l'intervallo di "fastidio" dei movimenti del suolo riduce le possibilità che terremoti incontrollati possano causare danni inaccettabili. In secondo luogo, l'impostazione di soglie di luce gialla di circa due unità di grandezza inferiori alla luce rossa garantisce che gli operatori abbiano un'opportunità sufficiente per attuare strategie di mitigazione.

- [K. H. Palgunadi et al.](#): Interazione dinamica tra faglie durante un terremoto indotto da iniezione di fluido: l'evento Pohang di  $M_w = 5.5$  del 2017:

Gli autori collegano il terremoto del 2017 alla stimolazione idraulica e all'iniezioni di fluidi, e lo considerano il più grande evento sismico indotto associato a un sistema EGS. Per comprenderne le dinamiche che lo hanno provocato e le interazioni di faglia, conducono le prime simulazioni 3D di rottura dinamica spontanea ad alta risoluzione di un terremoto indotto. Tengono conto tra altro della topografia, della deformazione plastica fuori faglia sotto la coesione nel volume roccioso in dipendenza dalla profondità. Nel loro modello, la rottura del terremoto "salta" a una faglia secondaria tramite innesco dinamico. Le simulazioni suggeriscono che durante i terremoti indotti dall'iniezione di fluido può verificarsi un'interazione dinamica complessa delle faglie e che le perturbazioni di stress locali dominano sulle condizioni di stress regionali. Pertanto, i loro risultati hanno importanti implicazioni per la pericolosità sismica nel serbatoio geologico attivo.

- 2) [C. Lord-May, J. Baró, D. W. Eaton, J. Davidsen \(2020\)](#): rischio sismico dovuto a iniezioni di fluidi; PHYSICAL REVIEW RESEARCH 2, 043324:

I terremoti possono essere indotti da processi naturali, e da processi antropogenici di iniezione o migrazione di fluidi all'interno delle formazioni rocciose. Varie osservazioni sul campo hanno portato alla formulazione di tre paradigmi diversi e apparentemente contraddittori, rilevanti per la stima del rischio sismico associato a iniezioni di fluidi. Questi paradigmi sono:

- (A) sismicità indotta da fluidi dovuta all'attivazione di piccole fratture all'interno del serbatoio stimolato, (B) attivazione di fratture dinamiche preesistenti contenute all'interno del

area stimolata che aumenta nel tempo in proporzione al volume totale iniettato, (C) attività sismica innescata da iniezioni di fluidi, il che significa che l'attività naturale (tettonica) è semplicemente anticipata.

Gli autori introducono un modello concettuale unificato che tiene conto della stimolazione della pressione dei pori non omogenea causata dall'iniezione di fluido in una regione precompressa, per dimostrare come tutti e tre i paradigmi possano coesistere naturalmente. Secondo il modello, la cronologia degli stress provenienti sia dalle iniezioni di fluidi che dal carico tettonico naturale, determinano, insieme all'eterogeneità della matrice, quale dei tre paradigmi prevale in un dato momento.