

Le perforazioni profonde a scopo scientifico: esiste un rischio “sismico”?

Giuseppe De Natale, Paolo Gasparini

Perforazioni e carotaggi sono importanti per conoscere la struttura superficiale del pianeta. Le perforazioni profonde a scopo scientifico possono essere cruciali per la soluzione di importanti problemi scientifici inerenti la mitigazione dei rischi sismici e vulcanici. Il Campi Flegrei Deep Drilling Project è iniziato nel 2009 con una perforazione esplorativa che ha raggiunto una profondità di 500 m. È dimostrabile che tale perforazione non ha avuto alcuna influenza sulla fenomenologia in atto ai Campi Flegrei.

Malgrado le metodologie geofisiche per indagare l'interno della Terra abbiano fatto grandi passi avanti negli ultimi decenni, il metodo di indagine più efficace per conoscere almeno la struttura superficiale del nostro pianeta è quello diretto, con perforazioni e carotaggi.

Il problema principale delle metodologie “indirette”, quali le geofisiche, è che all'aumentare della profondità diminuisce il potere risolutivo, e quindi la possibilità di rilevare la presenza e le caratteristiche di corpi di piccola dimensione. Inoltre, alcuni parametri importanti delle rocce (ad esempio lo stato termico) possono essere determinati da tali metodi solo con grande incertezza. Il carotaggio della crosta terrestre permette, al contrario, di determinare con precisione tutte le proprietà di interesse, sebbene in maniera puntuale, ossia nel solo punto di perforazione. Le metodologie geofisiche di prospezione hanno quindi il loro utilizzo ottimale nel correlare i risultati ottenuti da perforazioni effettuate in località diverse. Le perforazioni possono fungere da punti di calibrazione per le immagini ottenute da metodologie geofisiche che permettono di indagare estesi volumi di sottosuolo.

Il problema principale delle perforazioni profonde è il costo, ordini di grandezza maggiore di quello delle normali metodologie geofisiche. Per questo motivo le perforazioni non costituiscono un me-

todo di indagine diffuso nella ricerca scientifica, che in genere non dispone di ingenti risorse. Al contrario, esse, anche al solo scopo di prospezione, sono comuni nelle attività altamente remunerative che utilizzano il sottosuolo: minerarie, petrolifere, geotermiche, ecc.

Nello studio dei terremoti e dei vulcani le perforazioni profonde a scopo scientifico possono essere cruciali per la soluzione di importanti problemi inerenti la mitigazione dei rischi sismici e vulcanici. Negli ultimi decenni infatti importanti problemi sismologici e vulcanologici sono stati affrontati ed in parte risolti con l'uso di perforazioni scientifiche: ne sono un esempio il progetto SAFOD lungo la faglia di San Andreas in California e quelle realizzate nell'area del vulcano Unzen in Giappone e nella caldera di Long Valley in California. La caldera dei Campi Flegrei è stata esplorata con perforazioni fin dalla fine degli anni '30 del secolo scorso, per la ricerca geotermica (Carlino et al., 2012; AGIP, 1987). La campagna di esplorazione degli anni '80, in particolare, sebbene finalizzata a scopi geotermici, ha fornito informazioni che ancor oggi rappresentano la sorgente di conoscenza di maggior attendibilità sulla natura e sullo stato termico della struttura profonda della caldera. D'altra parte, le perforazioni effettuate nel passato, oltre ad essere state finalizzate a scopi diversi da quello vulcanologico e con tecnologie oggi obsolete, non hanno interessato il settore centrale e quello

orientale, ma i settori occidentali (zona Mofete) e settentrionale (zona San Vito) della caldera.

Il *Campi Flegrei Deep Drilling Project* (CFDDP) è stato concepito per indagare i settori orientale e centrale della caldera, la cui conoscenza è di estrema rilevanza per gli studi di pericolosità vulcanica e per la gestione dell'altissimo rischio ad essa associato, specialmente nel settore orientale che contiene buona parte della città di Napoli. Il Progetto, nato nel 2005 nell'ambito delle attività dell'*International Continental Drilling Program*, consorzio internazionale per la promozione delle perforazioni profonde a scopo scientifico, è stato varato nel 2009 dopo 4 anni di progettazione e valutazione internazionale.

La prima fase del progetto, consistente nella realizzazione di un pozzo di 500 metri principalmente per scopi stratigrafici e per l'installazione di sensori di monitoraggio, era stata programmata per ottobre 2010, ma l'inizio è stato ritardato di quasi due anni a causa di una campagna di stampa, che descriveva il progetto come foriero di possibili effetti catastrofici sull'ambiente e sulla popolazione. Tra i possibili "incidenti" ipotizzati, quelli che hanno maggiormente colpito la fantasia della popolazione, ampiamente descritti da alcuni quotidiani e da altri canali mediatici, sono stati l'eruzione vulcanica ed i terremoti. Mentre è abbastanza semplice convincersi che una perforazione non può causare un'eruzione, anche nel caso estremamente raro, ma realmente avvenuto (<http://www.geothermal.is/deep-drilling-case-study/deep-drilling-project-iddp>), che si raggiunga una zona di accumulo magmatico, l'idea che una perforazione possa causare terremoti può sembrare maggiormente fondata. Alcuni incidenti accaduti in tempi recenti sono stati spesso semplicisticamente attribuiti ai processi di perforazione, mentre in realtà tali rischi sono esclusi-

sivamente imputabili all'utilizzo che si fa della perforazione stessa "dopo" la sua realizzazione.

In effetti, un rischio di sismicità indotta è generalmente associabile ad attività che comportino l'iniezione o l'estrazione di fluidi da serbatoi crostali, specialmente in aree caratterizzate da alti sforzi tettonici, ossia da notevole sismicità naturale. I meccanismi precisi della sismicità indotta non sono completamente chiari. Il loro meccanismo generale può essere descritto come conseguenza delle perturbazioni dello stato di sforzo del sottosuolo, provocate dall'iniezione/estrazione di fluidi. In pratica, quando si iniettano o si estraggono grandi quantità di fluidi per tempi lunghi negli strati rocciosi, si alterano gli equilibri di sforzo in profondità, e quindi si può favorire lo scorrimento di faglie già cariche di sforzo tettonico o, in alcuni casi, creare ex-novo fratture sismogenetiche. Questo effetto è molto più marcato nel caso di iniezione di fluidi, ad alte pressioni, che non durante l'estrazione dei fluidi da un serbatoio, in quanto l'aumento di pressione ha un carattere maggiormente destabilizzante rispetto ad una situazione di equilibrio dello stato di sforzo. Inoltre, l'effetto sismogenetico è maggiore quanto più lungo è il tempo di iniezione/estrazione, ossia quanto maggiori sono i volumi di fluido iniettati/estratti ed i volumi di roccia coinvolti, e quindi maggiore è la perturbazione allo stato di sforzo ed il volume di roccia perturbato. Con queste premesse, non è ipotizzabile che una semplice perforazione, senza iniezione o estrazione di fluido, possa generare o anche favorire terremoti, in quanto non causa variazioni dello stato di sforzo in profondità.

Un pozzo potrebbe intercettare, durante la perforazione, una sacca di liquido o di gas; questo è l'incidente universalmente più temuto in una perforazione. Tutti gli impianti di perforazione moderni

sono infatti specificamente equipaggiati per affrontare questo rischio, mediante vari livelli di dispositivi per la chiusura ermetica veloce del pozzo, chiamati *blow-out preventer* (ossia “inibitori di eruzione”, in quanto la fuoriuscita di fluidi in pressione da un pozzo è detta tecnicamente “eruzione del pozzo”). La fuoriuscita di fluidi in pressione, nel caso in cui questi siano gas nocivi come anidride carbonica o idrogeno solforato, costituisce il maggior pericolo di una perforazione, che però si limita generalmente all’area del cantiere in quanto le concentrazioni di gas diminuiscono rapidamente con la distanza dal punto di emissione, raggiungendo livelli inferiori a quelli di minimo rischio entro poche decine di metri di distanza. Un’ipotetica “eruzione” di fluidi dal pozzo non può generare terremoti propriamente detti, ma soltanto, nei casi più gravi, un leggero tremore legato al degassamento superficiale.

L’incidente più noto, al quale fa riferimento la campagna di stampa contro il CFDDP, è quello legato al terremoto che avvenne a Basilea nel dicembre del 2006, durante le operazioni che dovevano portare alla creazione di una centrale elettrica basata sulla geotermia stimolata (EGS – *Enhanced Geothermal Systems*) al centro della città di Basilea. Questi tipi di impianti geotermici utilizzano strati rocciosi profondi ad alta temperatura che, data la scarsa permeabilità, non contengono naturalmente l’acqua necessaria alla produzione dell’energia. L’acqua viene iniettata dalla superficie terrestre nelle rocce calde e poi prelevata, dopo che si è riscaldata, per alimentare gli impianti. Per creare un serbatoio permeabile in cui l’acqua immessa dalla superficie possa circolare riscaldandosi, bisogna aumentare artificialmente la permeabilità delle rocce calde, cosa che si ottiene iniettando acqua con pressione tale da fratturarle (il processo viene tecnicamente chiamato *fracking*). Per

generare un *fracking* diffuso si iniettano nelle rocce calde flussi di acqua tali da generare alte pressioni (fino a diverse decine di MPa) che producono, negli strati scarsamente permeabili, una rete di piccole fratture, che formandosi generano piccoli terremoti. L’iniezione di acqua per la creazione del serbatoio permeabile dura in genere decine di giorni o anche qualche mese. A Basilea, un pozzo di cinque chilometri di profondità, la stessa a cui si trovava lo strato ad alta temperatura, era stato perforato per questo scopo. Ovviamente, tale operazione non causò di per sé nessun problema. Invece, dopo diverse settimane di “stimolazione” idraulica, consistente nella iniezione di circa 50-100 litri di acqua al secondo, con pressioni a fondo pozzo di 40-60 MPa, cominciarono a verificarsi diverse migliaia di microterremoti (in gran parte di Magnitudo minore di 2), fino ad un terremoto di Magnitudo 3,4, che pur non producendo danni rilevanti, fu chiaramente avvertito dalla popolazione. Questo evento, chiaramente provocato da attività umane (l’ipocentro del terremoto era sotto il pozzo), creò grande sconcerto nella popolazione e nell’opinione pubblica internazionale. Il terremoto era stato provocato dall’iniezione continua di grandi volumi di acqua, con alti flussi e la creazione di corrispondenti sovrappressioni, e non certamente dalle operazioni di perforazione del pozzo.

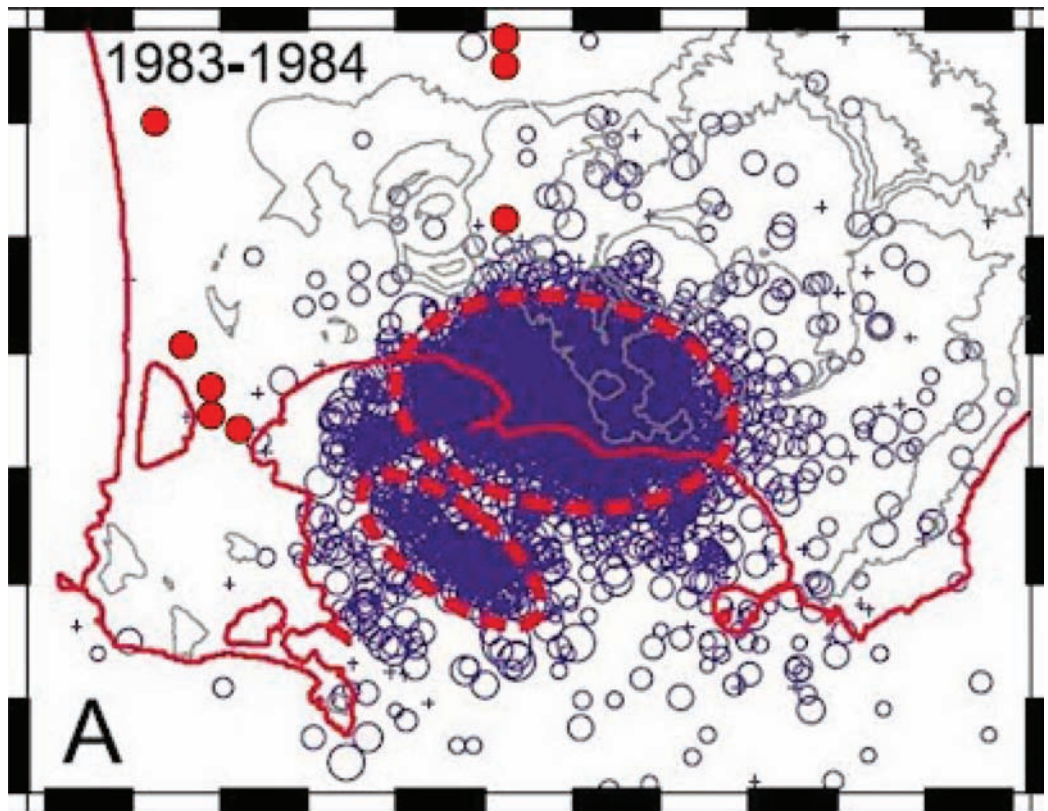
Una osservazione interessante sul possibile rapporto tra perforazioni profonde e sismicità viene proprio dalle perforazioni a scopo geotermico effettuate fino al 1985 nell’area flegrea da ENEL ed AGIP. Queste perforazioni furono effettuate durante il noto fenomeno di bradisisma del 1982-1985, che portò tra l’altro all’evacuazione di una parte della cittadina di Pozzuoli, trasferita nella *new town* di Monterusciello. In quegli anni le reti sismiche dell’Osservatorio Vesuviano registrarono circa 15.000

terremoti, con Magnitudo fino a 4,2 (De Natale e Zollo, 1986). In Figura 1 è riportata la mappa dell'area flegrea con le localizzazioni di molti dei terremoti accaduti in quel periodo (D'Auria et al., 2011); i cerchi rossi rappresentano i pozzi dell'epoca, localizzati nelle aree Mofete e San Vito. È importante sottolineare che in quei pozzi, oltre alla semplice perforazione e carotaggio di alcuni settori, venivano effettuati anche diversi esperimenti, quali "prove di emungimento" consistenti in prelievi continui di grandi quantità di fluidi per diversi giorni, nonché "stimolazioni idrauliche", consistenti nell'iniezione di acqua ad alta pressione per rendere i pozzi produttivi (ossia stimolare la fuoriuscita spontanea di fluidi geotermici). Nonostante tutto, tutta la sismicità era concentrata in aree assolutamente diverse da quelle di perforazione. Ciò avveniva perché i terremoti erano natu-

ralmente prodotti dal fenomeno bradisismico (in numero approssimativamente proporzionale ai tassi di sollevamento) e le perforazioni erano localizzate sui bordi calderici, dove i tassi deformativi erano molto bassi. D'altra parte, questa coincidenza fortuita della non sovrapposizione tra i siti di perforazione e le aree soggette a forti tassi deformativi dimostra, nel modo più evidente possibile, che, nonostante il periodo particolare e l'alta sismicità dell'area, le operazioni di perforazione, ancorché accompagnate da discontinui prelievi/reiniezioni di fluidi, non hanno avuto il minimo effetto sismogenetico.

Resta da sottolineare un ultimo punto. Sebbene in linea di principio l'estrazione di fluidi geotermici per tempi lunghi ed in grandi quantità possa favorire la sismicità, l'area geotermica più antica del mondo, quella di Larderello in Toscana, in cento anni di sfruttamento geotermi-

Figura 1. Localizzazione dei terremoti ai Campi Flegrei registrati nel periodo 1983-1984, di massimo bradisisma. I cerchi vuoti, con raggio proporzionale alla Magnitudo, rappresentano le localizzazioni dei circa 15000 terremoti registrati all'epoca. I cerchi rossi rappresentano le localizzazioni dei pozzi profondi ENEL-AGIP effettuati nello stesso periodo. Si noti che, malgrado l'enorme sismicità delle aree intorno a Pozzuoli, le zone dove si perforarono i pozzi (fino a 3050 metri di profondità) risultavano assolutamente prive di sismicità. (figura da D'Auria et al., Journ. Geophys. Res., 2011).



co non ha mai presentato problemi di sismicità anomala. Altre aree geotermiche simili, come quella di *The Geysers* localizzata nel parco di Yellowstone (USA), hanno avuto occasionalmente terremoti probabilmente indotti dall'estrazione geotermica prolungata, fino a Magnitudo maggiori di 4. Entrambe queste aree sono caratterizzate da prelievo di grandi quantità di fluido (sono quelle con le maggiori potenze elettriche installate al mondo), senza re-iniezione in falda di quantità significative del fluido prelevato. Nell'ambito di un progetto FP7 della Comunità Europea, il cui acronimo è appunto *Geiser*, il principale contributo di AMRA è stato la elaborazione di una procedura probabilistica di valutazione della variazione della pericolosità sismica durante i prelievi di fluido, che possa servire da guida ad una conduzione delle operazioni in condizioni di sicurezza. In realtà, poiché l'instabilità di sforzo potenzialmente sismogenetica è legata al prelievo di grandi volumi di fluido, per tempi lunghi, impianti geotermici che prevedano la re-iniezione totale del fluido estratto, nella stessa falda di provenienza, potrebbero eliminare il problema di possibile sismicità indotta. Ciò avviene se i pozzi di re-iniezione sono scelti in modo tale da assicurarsi che i tassi di re-iniezione di fluido siano velocemente assorbiti dai pozzi, senza generare sovrappressioni significative. In tal modo, dopo un breve transiente iniziale, il serbatoio geotermico produttivo non è alterato nella quantità di fluido contenuto (il bilancio totale tra estrazione e re-iniezione è nullo) ed è quindi nulla la variazione di sforzo prodotta. Per concludere, anche l'impiego

geotermico con re-iniezione totale dei fluidi, purché effettuata in pozzi di sufficiente permeabilità, non comporta nel sottosuolo variazioni di sforzo a regime, e non è quindi sismogenetica. Ciò è tanto più vero quanto più superficiale è la profondità dei pozzi, in quanto gli strati più superficiali sono di per sé meno sismogenetici.

Bibliografia

- AGIP, 1987. Geologia e geofisica del sistema geotermico dei Campi Flegrei, Technical report. Settore Esplor e Ric Geoterm-Metodol per l'Esplor Geotermica, San Donato Milanese Italy, 1-23.
- Carlino S., Somma R., Troise C., De Natale G. (2012) Geothermal exploration of Campanian volcanoes: historical review and future development. *Renew. & Sustain. Energy Rev.* 16, 1, 1004-1030.
- Convertito V., Maerclin N., Sharma N., Zollo A. (2012). From Induced seismicity to Direct Time Dependent Risk Assessment. *Bull. Seism. Soc. America*, 102: 2563-2573 doi: 10.1785/01.20120036.
- D'Auria L., Giudicepietro F., Aquino I., Borriello G., Del Gaudio C., Lo Bascio D., Martini M., Ricciardi G.P., Ricciolino P., Ricco C. (2011) Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989–2010), *J. Geophys. Res.*, 116, B04313.
- De Natale G., Troise C., Sacchi M. (2007) The Campi Flegrei Deep Drilling Project, *Scientific Drilling*, 4, doi:10.2204/iodp.sd.4.15.2007.
- De Natale G., Zollo, A. (1986) Statistical analysis and clustering features of the Phlegraean Fields earthquake sequence, May '83-May '84. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 801-814.
- Troiano A., Di Giuseppe M.G., Troise C., Tramelli A., De Natale G. (2013) A Coulomb stress model for induced seismicity distribution due to fluid injection and withdrawal in deep boreholes. *Geophys. Journ. Int.*, in corso di stampa.
- Giardini D. (2009) Geothermal quake risks must be faced, *Nature*, 462, 848-849.