Induced Seismicity and Related Risk in Italy

Marco Mucciarelli*

SUMMARY – *The seismicity induced by human activities is a subject almost unknown in Italy, with an average of published works on the subject at a fraction of a percentage of what is being published abroad. The first part of this paper discusses the historical reasons for this lack of interest, while the second will examine the implications in terms of seismic risk and possible regulations following the example of other European countries.*

Keywords: reservoir induced seismicity, seismic hazard.

1. **Introduction**

"Induced seismicity" usually refers to two categories of events. The first concerns the cause-effect relationship between natural earthquakes, which do not follow the traditional assumptions of independence between events and the seismic process in the absence of memory (e.g., the aftershocks caused by the main shock). The second category is related to earthquakes whose cause is to be found in human activities, and it is this which will be discussed in the following. It should be noted that it is not intended to refer to the man-made generation of seismic waves is in a voluntary (seismic exploration) or involuntary way (traffic, oscillation of structures, supersonic aircraft, etc.), but to the activation of seismic sources otherwise quiescent.

There are several types of human activities that can cause earthquakes, of which the main ones are:

- Impounding of hydroelectric reservoirs
- Mining
- Extraction / reinjection of fluids
- Construction of massive structures

In most case the events have low energy, are recordable only instrumentally and are not felt by the population, but there may be cases of major earthquakes, even greater than magnitude 6 as occurred for earthquakes induced by the impounding of the basins of Koyna (India) and Aswan (Egypt). Regardless of the low magnitude, many events have caused damage due to the fact that they are much closer to the surface than is the case for tectonic earthquakes. The induced earthquakes, besides causing damage to homes, may also damage the same structures (dam, injection plant, etc.) that are causing them.

For these reasons the phenomenon is widely studied and monitored: a literature search on Google Scholar with the key phrases "induced earthquake" and "induced seismicity" returns over 1000 articles published from 1980 to present, on average more than 30 per year. If the search is limited to Italy, a country rich in hydropower, geothermal wells, extraction of hydrocarbons, etc., we discover, surprisingly, that from 1964 to date only three papers have been published on the seismicity induced by dams /1, 2, 3/, two on the problem of seismicity induced by reinjection of fluids /4, 5/ and one that studies on the effect on seismicity by the variation of the groundwater regime possibly caused by the excavation of a tunnel or by climate change /6/.

2. **Historical framework**

What has happened in Italy to cause this (at least apparent) disregard for the induced seismicity?

We must go back to 1964, after the catastrophe of Vajont. In that year, prof. Caloi, then principal geophysicist of the National Institute of Geophysics published a work in which noted how the start of of the reservoir impounding gave rise to a sequence of induced seismicity in the same rock shoulder that later collapsed causing the tragedy (Fig. 1; for this and other studies cited in the following, see the review work /7/). Vajont was not the first case of seismicity induced by hydroelectric reservoirs of which there was news in Italy: still the same prof. Caloi since 1951 had studied the events induced by the cycles of filling and emptying of the Pieve di Cadore reservoir (in that case, the seismicity was sporadic and in attenuation, without further consequences). The possible correlation between the Vajont induced seismicity and the following landslide created a precedent of which some would have preferred to speak as little and to forget as soon as possible. To these people was referring Caloi when closing his review article of 1970, near to his retirement for age limits, he wrote: "*It is certainly understandable that an expert is brought in good faith to make judgments favorable to the party who has requested them. Is not justifiable that, for this purpose, he mentions figures that do not correspond to reality, or not duly controlled. The man of science must always and exclusively be in the service of truth*".

In Italy the seismic monitoring of the dams is required for a period of at least three years after

* Dipartimento di Strutture, Geotecnica e Geologia Applicata, Università della Basilicata, e-mail: marco.mucciarelli@unibas.it

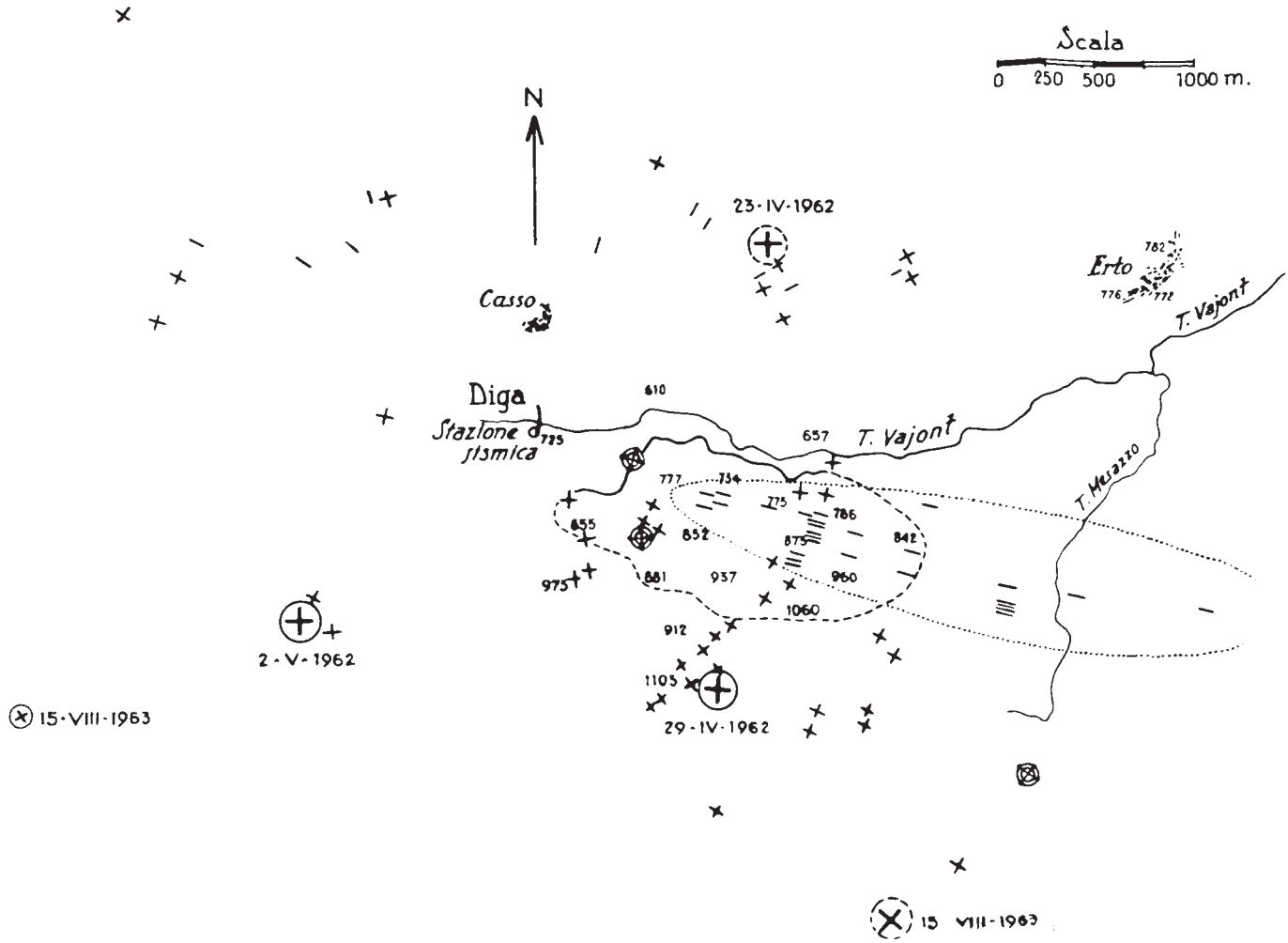

Fig. 1. *The seismicity associated to Vajont reservoir by Caloi (1964). The epicenters were located with the single station procedure, and report with signs + and – polarity of the first arrivals. The hatched area indicates the zone affected by Monte Toc landslide.*
La sismicità associata all'invaso del Vajont, da Caloi (1964). Gli epicentri sono stati localizzati con procedura da singola stazione, e riportano con segni + e – la polarità dei primi arrivi. L'area tratteggiata indica la zona di distacco della frana di Monte Toc.

completion (Ministry of Public Works Decree of 24 March 1982 "Technical Standards for the design and construction of dams"). The managing organizations have always complied with that requirement, but only in very rare cases they have allowed third parties to access the data: just think that of the three works above mentioned about induced seismicity, the most recent was made possible by a network of INGV installed for completely different purposes (microseismic monitoring of faults in the Agri valley). While in other countries the availability of data enables the scientific community to study the problem of induced seismicity, Italy has slowly moved to the belief that the problem does not exist, just because there is no public data.

What mentioned for the dams also applies to other types of induced seismicity. The same Caloi /7/ recalls the case of earthquakes at Cave del Predil (1965 and 1971), occurred at the Raibl mine, which caused three deaths and four injuries among miners, non-structural damage to the houses closest to the epicenter and it was noticeable up to 50 km away.

Another case of seismicity induced by human activities are the extraction / injection of fluids in the subsurface. Caloi /7/ cites the Lodi earthquakes of 15 and 16 May 1951 as induced by the extraction of methane gas.

All these works at the time encountered the resistance of a compact group that could be called "negationist" and openly linked to the operators of hydroelectric and mining concessions. The same Caloi reports a very effective explanation of why in the years to come the problem of induced seismicity in Italy was non-existent: "*To give you an idea of the coverup of the opinions of some experts on certain initiatives, I will mention the case of the Commission for the microseismicity of the dams, appointed by the Ministry of Public Works in 1965. This committee, to which I belonged, met for the first time May 18, 1965. Then they spent months and months to years without the slightest hint of a resumption of work. Only one my heartfelt letter to the Minister of Public Works of the time in January 1968 could result in its awakening. In any case, the work was limited to a single session, with the compilation of a report rather vague, in which only the writer emphasized the need for continuous geodynamic observations at large dams*".

This ambience laid the premise so that while in Italy only three papers on the subject were published, the worldwide estimated dated 10 years ago /8/ reported

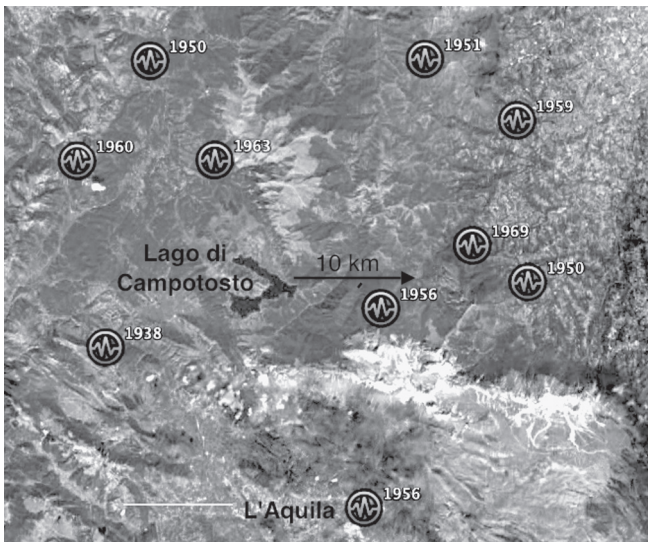

Fig. 2. *Earthquakes with IMCS > VI between 1900 and 2000 in the vicinity of Campotosto Lake (data from CPTI04).*
Terremoti con I_{MCS} > VI tra il 1900 ed il 2000 nelle vicinanze del Lago di Campotosto (dati da CPTI04).

about 100 confirmed cases of seismicity induced only by artificial water reservoirs. The lack of reliable public data severely limits the possibilities to study the seismic crisis of the past in terms of possible effects of induced seismicity. A case in point for all: the Campotosto dams. After the L'Aquila earthquake of 2009 there was concern for the three dams that block the reservoir, because the seismicity has been attributed to the fault of Campotosto which has a surface expression in the vicinity of Rio Fucino dam (see, e.g. /9/). Before this sequence, the only evidence of seismic activity along this fault line was historically assigned to a sequence of earthquakes during the 50's of last century. The dams that block the Rio Fucino have had an initial phase of construction in the late '30s, were initially completed in 1950 and were then elevated from the mid 60s. Looking at the seismicity above the VI degree MCS in a radius of about 20 km from the basin between 1900 and 2000 (data taken from the catalog CPTI /10/) as shown in Figure 2, we observe that all events are concentrated in the above mentioned periods of construction and new impounding of the reservoir. The lack of more precise data (the error on epicenters in the picture is of the order of tens of km) does not allow to define more carefully the links of cause and effect between the level of the basin and seismicity, preventing to establish if the Campotosto fault recent activity has tectonic or anthropogenic causes, with obvious consequences on the accuracy of estimates of seismic hazard.

3. **Seismic risk from induced seismicity**

The increase in seismic risk caused by the possibility of induced seismicity can be summarized in three aspects that change the hazard factor:

1) Deviation from the seismic model assumed for the standard estimates

2) higher accelerations due to reduced depth of the hypocenters

3) Anticipation of the occurrence of natural quakes

Let's examine these factors in the following.

3.1. *Deviation from the standard model of seismicity*

The standard estimates of seismic hazard is based on the assumption that earthquakes follow a Poisson distribution, i.e. they are independent of each other and the rate of the process is constant. The induced seismicity violates these assumptions, causing events that follow highly non-linear processes in space and time. After a phase of seismicity induced by increased loads from human activities, evolution can be of two types: 1) leading to a decrease in the magnitude of the affected volume and frequency of quakes 2) causing sudden increases in seismicity, with violent shocks that persist over time even at a distance from the starting point.

This bifurcation behavior suggests that is essential to monitor with microseismic networks all human activities that can induce seismicity, in order to stop the triggers as soon as possible when the evolution of the sequence evolves unfavorably. Not always it may be possible to avoid unwanted changes. Two famous examples concern the cities of Basel and Denver.

In 2006 in Basel, a private company wanted to pump cold water in an area of hot and dry rocks to stimulate the production of geothermal steam for district heating and electricity production. The first day of injection, after only 16 hours of operation there was an earthquake of magnitude higher than what considered safe. The water injection was stopped immediately, but in the hours following the seismicity continued to increase up to produce a shaking equivalent to I_{EMS} = V /11/ forcing the company to pay damages of about 7.5 M €.

Earthquakes in Denver were even more long-term and at longer distance. In 1964 the U.S. Army began to pump wastewater into a well at 3600 m depth in the Rocky Mountains. The operation continued until 1966, despite several shocks were felt in an area normally not seismic. Only in 1965 a geologist convinced the local authorities of the connection between earthquakes and reinjection /12/, but also once the pumping activities were suspended, earthquakes continued for another 6 years, while remaining felt by the population until 1968 and reaching the maximum magnitude shock in 1967 with three M > 5 quakes, which caused structural damage to buildings in the city of Denver /13/. Many other cases in the world have shown that it is not possible to establish simple linear relationships between the applied stimulus and the induced response, nor is it possible to predict in advance, once you start the process of propagation of a major fault, where and when the process stops. It is therefore impossible to include the induced seismicity in the traditional models of seismic hazard.

3.2. *Higher accelerations for shallow depth*

A feature that makes the induced seismicity particularly insidious is the possibility that the shocks occur much closer to the surface with respect to what happens with the tectonic earthquakes. The shallower depth of

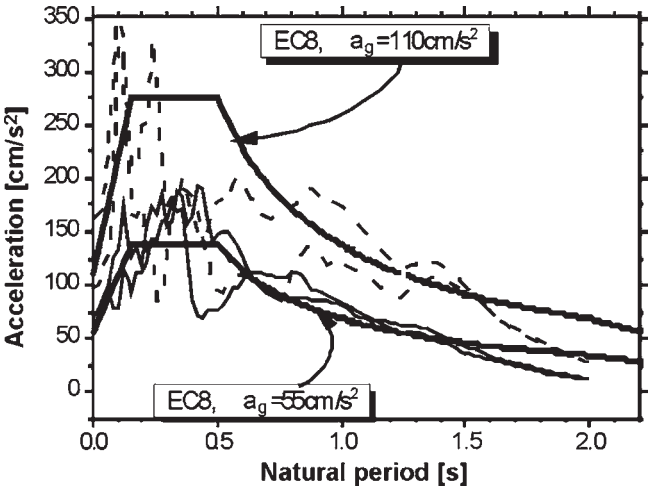

Fig. 3. *Comparison between the recording of an earthquake induced by mining activity and the spectrum of EC8 for the same PGA anchor value (from Zembaty, 2011).*
Confronto tra la registrazione di un terremoto indotto da attività mineraria e lo spettro EC8 per pari PGA di ancoraggio (da Zembaty, 2011).

hypocenters results in a greater attenuation away from the epicenter, but also greater acceleration and macroseismic intensity near it. A similar behaviour is found in nature for volcanic earthquakes and it is well known in Italy because it is important to use special GMPEs and earthquakes intensity-magnitude conversions other than standard one (see the recent example provided by the study of Etna earthquakes by /14/). In some European countries where induced seismicity is more dangerous than natural, there had been proposals to introduce spectral shapes consistent with the Eurocode8 standards /15/. In the case of The Netherlands, the most advanced country from this point of view, the induced seismicity must be considered in the seismic design of industrial and strategic structures, applying attenuation relationships developed specifically /16/. The response spectra of induced earthquakes are generally characterized by a high frequency acceleration content higher than the standard spectra for the same anchoring PGA, as can be seen from the example drawn from the work of Zembaty /15/ and reported in figure 3.

In Italy there is lack of information regarding the accelerations and spectral shapes typical of the induced seismicity. In the Monte Amiata geothermal field in 2000 there was an earthquake of magnitude 3.9 that caused structural damage in an sparsely populated area, making several houses unusable for a total of 41 homeless. Available recordings of the national accelerometric network were used to calibrate the estimates of peak acceleration obtained from the analysis of damage and site amplifications /17/: the values obtained for 5 of the 21 locations tested were above the acceleration of 0.14 g provided by the current seismic code for the area (Figure 4).

3.3. *Time advance of natural quakes occurrence*

In recent times, in Italy there are several studies on underground storage of natural gas, mainly in depleted reservoirs. In environmental impact assessments submit-

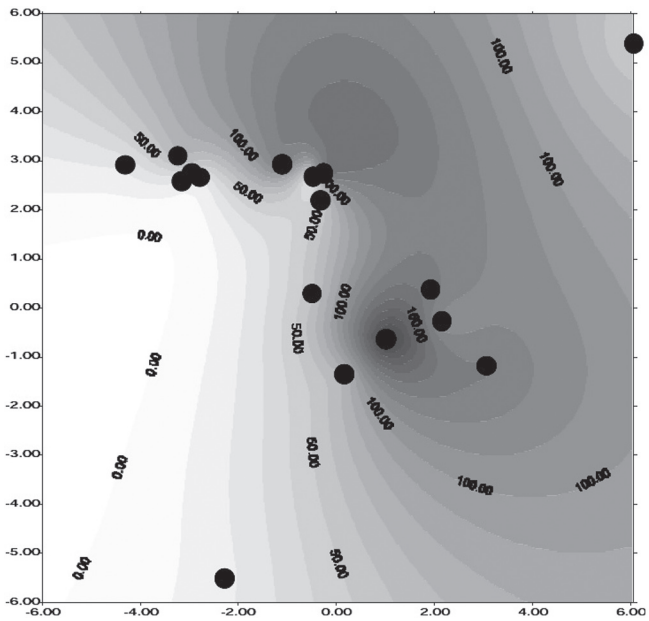

Fig. 4. *Estimated accelerations for the earthquake of the Monte Amiata geothermal field of April 2000, modified from Mucciarelli et al. (2001). The axes scale is km from the epicentre. The current seismic zoning for the area provides a value of 0.14 g.*
Accelerazioni stimate per il terremoto del campo geotermico del Monte Amiata dell'Aprile 2000, modificata da Mucciarelli et al. (2001). La scala degli assi è in km a partire dall'epicentro. La attuale classificazione sismica prevede per l'area un valore di 0.14 g.

Fig. 5. *In gray, seismic areas classified for the first time in 2003 (amended from Crowley et al., 2007), where the housing stock should be adapted to the design values expected for the next earthquake.*
In grigio, le aree classificate sismiche per la prima volta nel 2003 (modificata da Crowley et al., 2007), dove il patrimonio edilizio deve essere quindi adeguato ai valori di progetto attesi per i prossimi terremoti.

ted in support of requests for these projects, it is not uncommon to find a general underestimation of induced seismicity, both for naturally aseismic or seismic areas. For the latter is sometimes considered that a possible induced seismicity would only be limited to anticipate events that could have occurred sooner or later anyway. This consideration is incorrect not only for the above mentioned reasons (the induced seismicity does not follow the statistical distribution of the natural one, the accelerations are higher) but mainly because the time factor can not however be considered irrelevant. The latest studies on the seismic hazard in Italy show that for most of the country there is a lack of protection in areas that have now been classified as seismic zones but were not previously considered as such, and thus anti-seismic design was not requested (Fig. 5 from /18/). Therefore in these areas is not desirable that earthquakes occur before their natural time, as retrofitting housing and other strategic structures (schools, hospitals, government offices, etc.) will take a long time.

4. **Conclusions**

In Italy studies on induced seismicity are chronically lagging behind the rest of the world given the absence of published data on this phenomenon. This lack of data and studies could be confused with the absence of the phenomenon itself. This would be dangerous in a time when there is a strong interest in underground activities such as geothermal energy, natural gas storage and sequestration of carbon dioxide.

Even in areas with low levels of natural seismicity it should be envisaged the installation of microseismic networks that allow for monitoring of the induced seismicity. The data from these networks should be made available on public sites. The plant design should consider also that they may induce seismicity, as already happens in other European countries. The desirable future availability of data for minor tremors could allow to construct attenuation relations of acceleration with distance and magnitude-intensity conversion specifically for the induced seismicity. Lastly, greater precautions should be taken in those areas where existing structures are already inadequate for the natural seismicity.

References

/1/ Piccinelli F.G., Mucciarelli M., Federici P., Albarello D. (1995). The microseismic network of the Ridracoli dam, northern Italy: data and interpretations, PAGEOPH, 145, 97-108.

/2/ Giuseppetti G., Zaninetti A., Angeloni P., Mucciarelli M., Federici P. (1996). Fifteen years of Acoustic Emissions and Microseismic Activity monitoring at the Passante hydroelectric reservoir, Proceedings of the 1997 ICOLD conference, 1007-1024.

/3/ Valoroso L., Improta L., Chiaraluce L., Di Stefano R., Ferranti L., Govoni A., Chiarabba C. (2009). Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri area (Southern Apennines, Italy) Volume 178, Issue 1, pages 488-502.

/4/ Batini F., Console R., Luongo G. (1985). Seismological study of Larderello-Travale geothermal area. Geothermics 14: 255-272.

/5/ Mulargia F., Castellaro S. (2004). Geotermia stimolata e rischio sismico: un compromesso difficile; Atti della Conferenza Nazionale sulla Politica Energetica in Italia, Bologna 16-18 aprile 2004.

/6/ Bella F., Biagi P.F., Caputo M., Cozzi E., Della Monica G., Ermini A., Plastino W., and Sgrigna V. (1998). Aquifer-induced Seismicity in the Central Apennines (Italy), Pure Appl. Geophys., 153, 179-194.

/7/ Caloi P. (1970). Come la natura reagisce all'intervento dell'uomo – Responsabilità di chi provoca e di chi intrepreta tali reazioni (1970), Annali di Geofisica, XXII, 247-282.

/8/ Gupta H.K. (2002) A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India, Earth-Science Reviews, 58, 279-310.

/9/ Amato A., Galli P., Mucciarelli M. (2011). Introducing the special issue on the 2009 L'Aquila earthquake, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 52, 3, 1; September 2011 DOI 10.4430/bgta0033.

/10/ Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. Disponibile su http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/, ultimo accesso 8 settembre 2011.

/11/ Deichmann N., Giardini D. (2009). Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland), Seismological Research Letters, 80 784-798.

/12/ Evans D.M. (1966) The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal disposal well, Mr. Geol., 3(1), 23-36.

/13/ Hsieh P.A., Bredehoeft J.D. (1981). A Reservoir Analysis of the Denver Earthquakes' A Case of Induced Seismicity, Journ. Geoph. Res., 86, B2, 903-920.

/14/ Azzaro R., D'Amico S., Tuvè T. (2011). Estimating the Magnitude of Historical Earthquakes from Macroseismic Intensity Data: New Relationships for the Volcanic Region of Mount Etna (Italy); Seismological Research Letters, 82, 533-544.

/15/ Zembaty Z. (2011). How to model rockburst seismic loads for civil engineering purposes? Bull. Earthquake Eng. 9:1403-1416.

/16/ Mucciarelli M., Gallipoli M.R., Fiaschi A., Pratesi G. (2001). Osservazioni sul danneggiamento nella zona del Monte Amiata a seguito del terremoto del 1° Aprile 2000, Atti del X Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Potenza-Matera, Edizione su CD-Rom.

/17/ van Eck T., Goutbeek F., Haak H., Dost B. (2006). Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands; Engineering Geology, 87, 105-121.

/18/ Crowley H., Pinho R., Faravelli M., Montaldo V., Meletti C., Calvi G.M., Stucchi M. (2007). Gli effetti dell'introduzione di una nuova mappa di pericolosità sulla valutazione del rischio sismico in Italia, Atti del XII congresso nazionale "L'ingegneria sismica in Italia", Pisa, CD-Rom.

Sismicità indotta da attività antropiche e rischio derivante

M. Mucciarelli

SOMMARIO – *La sismicità indotta da attività antropiche è un argomento quasi sconosciuto in Italia, con una media di lavori editi sull'argomento pari ad una frazione percentuale di quanto viene pubblicato all'estero. Nella prima parte dell'articolo vengono discusse le motivazioni storiche di questo disinteresse, mentre nella seconda si esaminano le ricadute in termini di rischio sismico e possibili normative seguendo l'esempio di altri paesi europei.*

Parole chiave: sismicità indotta, rischio sismico.

1. Introduzione

Con sismicità indotta ci si riferisce di solito a due categorie di eventi. La prima riguarda le relazioni di causa effetto tra terremoti naturali, che facciano venire meno le tradizionali assunzioni di indipendenza tra eventi e assenza di memoria nel processo sismico (p.e., le scosse di assestamento indotte dalla scossa principale). La seconda categoria è quella relativa a terremoti la cui causa scatenante è da ricercarsi in attività antropiche, ed è di questa che discuteremo. È bene precisare che non si intende riferirsi alla generazione di onde sismiche sia in modo volontario (sismica di esplorazione) che involontario (traffico, oscillazione di strutture, aerei supersonici, ecc.), quanto alla attivazione di sorgenti sismiche altrimenti quiescenti.

Esistono numerosi tipi di attività umane in grado di provocare terremoti, di cui le principali sono:

- Riempimento di bacini idroelettrici
- Attività minerarie
- Estrazione/reiniezione di fluidi
- Costruzione di strutture massicce

In genere si tratta di eventi di modesta energia, registrabili solo strumentalmente e non avvertibili dalla popolazione, ma si possono verificare casi di terremoti molto forti, superiori a magnitudo 6 come è occorso per i terremoti indotti dai riempimenti dei bacini di Koyna (India) ed Aswan (Egitto). Indipendentemente dalla bassa magnitudo, molti eventi indotti hanno causato danni per il fatto di avvenire molto più prossimi alla superficie di quanto non accada per i terremoti naturali.

I terremoti indotti, oltre a causare danni ad abitazioni, possono poi danneggiare le stesse opere che li hanno causati. Per questo motivo il fenomeno è ampiamente studiato e monitorato: una ricerca bibliografica su Google Scholar con le frasi chiave "*induced earthquake*" e "*induced seismicity*" restituisce oltre 1000 articoli pubblicati dal 1980 ad oggi, in media oltre 30 all'anno. Se si restringe la ricerca all'Italia, paese ricco di centrali idroelettriche, impianti geotermici, pozzi di estrazione di idrocarburi si scopre sorprendentemente che dal 1964 ad oggi sono stati pubblicati solo tre lavori sulla sismicità indotta da dighe /1, 2, 3/, due sul problema della sismicità indotta da reiniezione dei fluidi /4, 5/ ed uno che studia l'effetto sulla sismicità della variazione del regime idrico sotterraneo possibilmente causato dallo scavo di un tunnel o da un cambiamento climatico /6/.

2. Inquadramento storico

Cosa è successo in Italia per causare questo (almeno apparente) disinteresse per la sismicità indotta?

Bisogna risalire al 1964, dopo la catastrofe del Vajont. In quell'anno viene pubblicato dal prof. Caloi, allora geofisico principale dell'Istituto Nazionale di Geofisica un lavoro in cui si evidenzia come l'inizio delle operazioni di invaso del bacino dette luogo ad una sequenza di sismicità indotta nella stessa spalla che più tardi franò causando la tragedia (Fig. 1; per questo ed altri studi citati nel seguito, si veda il lavoro riassuntivo /7/). Non era il primo caso di sismicità indotta da bacini idroelettrici di cui si aveva notizia in Italia. Sempre lo stesso Caloi a partire dal 1951 aveva studiato gli eventi indotti dai cicli di invaso e svaso del bacino di Pieve di Cadore (in quel caso la sismicità era stata sporadica ed in attenuazione, senza ulteriori conseguenze). La possibile correlazione al Vajont tra sismicità indotta ed il seguente distacco franoso creava un precedente di cui alcuni avrebbero preferito tacere e dimenticare al più presto. A queste persone si doveva riferire Caloi quando chiudendo il suo articolo di revisione del 1970, alle soglie del collocamento a riposo per limiti di età scriveva: "*È senz'altro spiegabile che un esperto sia portato anche in perfetta buona fede ad esprimere giudizi favorevoli alla parte che lo ha interpellato. Non è però giustificabile che, a questo fine vengano citate cifre non corrispondenti alla realtà, comunque non doverosamente controllate. L'uomo di scienza, se è tale, deve essere sempre ed esclusivamente al servizio della verità*".

Va tenuto presente che il monitoraggio sismico delle dighe è obbligatorio per un periodo di almeno tre anni dopo la costruzione (Decreto Ministero LL.PP. del 24 marzo 1982 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento"). Gli enti gestori hanno sempre ottemperato a tale obbligo, ma solo in rarissimi casi hanno permesso a terzi l'accesso ai dati: basti pensare che dei tre lavori sopracitati sulla sismicità indotta da invasi, il più recente è stato possibile grazie ad una rete dell'INGV installata per tutt'altri scopi (monitoraggio microsismico delle faglie della Val d'Agri). Mentre in altri paesi la disponibilità di dati consente alla comunità scientifica di studiare il problema della sismicità indotta, in Italia si è lentamente passati alla convinzione che il problema non esista, mentre semplicemente non esistono dati pubblici.

Quanto citato per le dighe vale anche per altri tipi di sismicità indotta. Lo stesso Caloi /7/ ricorda il caso dei terremoti di Cave del Predil dal 1965 al 1971, occorsi presso la miniera di Raibl, che causarono tre morti e quattro feriti tra i minatori, danni (non strutturali) alle abitazioni più prossime all'epicentro e furono avvertibili fino a 50 km di distanza.

Altro caso di sismicità indotta da attività umana sono le attività di estrazione/reiniezione di fluidi nel sottosuolo. Caloi /7/ cita i terremoti del Lodigiano del 15 e 16 Maggio 1951 come indotti dall'attività di estrazione di gas metano.

Tutti questi lavori incontrarono all'epoca la resistenza compatta di un gruppo che potremmo definire "negazionista" e apertamente legato ai gestori di bacini idroelettrici e concessioni minerarie. Lo stesso Caloi riporta una efficacissima spiegazione del perché negli anni a venire il problema della sismicità indotta in Italia è stato non-esistente: "*Per dare un'idea dell'azione di freno (o insabbiamento) dei giudizi di taluni esperti su certe iniziative citerò il caso della Commissione per la microsismicità delle dighe, nominata dal Ministero dei Lavori Pubblici nel 1965. Detta commissione, di cui facevo parte, si riunì per la prima volta il 18 maggio 1965. Poi trascorsero i mesi e con i mesi gli anni senza il minimo accenno di una ripresa dei lavori. Solo una mia vibrata lettera al Ministro dei Lavori pubblici dell'epoca nel gennaio 1968 riuscì a provocarne il risveglio. In ogni modo, i lavori furono limitati ad una sola seduta, con la compilazione di una relazione alquanto vaga, in cui soltanto lo scrivente sottolineava la necessità di osservazioni geodinamiche continue presso le grandi dighe*":

In questo modo si sono poste le premesse affinché mentre in Italia si pubblicavano solo tre lavori sull'argomento, una stima a livello mondiale di 10 anni fa /8/ riportava circa 100 casi dimostrati di sismicità indotta soltanto dagli invasi idrici artificiali. La mancanza di dati pubblici attendibili limita fortemente le possibilità di studiare crisi sismiche del passato in termini di possibili effetti di sismicità indotta. Un caso emblematico per tutti: il Lago di Campotosto. Dopo il terremoto dell'Aquila del 2009 si è avuta preoccupazione per le tre dighe che sbarrano il bacino, anche perché parte della sismicità è stata attribuita alla faglia di Campotosto che ha una espressione superficiale in prossimità della Diga di Rio Fucino (si veda, p.e., /9/). Prima di questa sequenza, l'unica evidenza di sismicità storicamente assegnata a questa faglia era una sequenza di terremoti degli anni '50 del secolo scorso. Le dighe che sbarrano il Rio Fucino hanno avuto una fase iniziale di costruzione alla fine degli anni '30, un primo completamento nel 1950 e sono poi state sopraelevate a partire da metà degli anni '60. Se si osserva la sismicità al di sopra del VI grado MCS in un raggio di circa 20 km dal bacino tra il 1900 ed il 2000 (dati presi dal catalogo CPTI /10/) riportata in Fig. 2, si osserva come tutti gli eventi si concentrino nei periodi sopra menzionati di inizio invaso e sopralzi del bacino. La mancanza di dati più precisi (l'errore sugli epicentri in figura è dell'ordine della decina di km) non permette di stabilire con maggiore cura nessi di causa effetto tra livello del bacino e sismicità, impedendo di stabilire quanto la faglia di Campotosto sia stata attiva per cause tettoniche o antropiche, con evidenti conseguenze sulla accuratezza delle stime di pericolosità sismica.

3. **Rischio sismico da sismicità indotta**

L'aumento di rischio sismico causato dalla possibilità di sismicità indotta si può riassumere in tre aspetti che modificano il fattore pericolosità:

1) Deviazione della sismicità dal modello assunto per le stime standard

2) Accelerazioni elevate causa ridotta profondità degli ipocentri

3) Anticipo dell'occorrenza di scosse naturali

Esaminiamo nel seguito questi fattori.

3.1. *Deviazione della sismicità dal modello standard*

Le stime standard di pericolosità sismica si basano sulla assunzione che i terremoti seguano una distribuzione di Poisson, ovvero che siano indipendenti tra loro ed il tasso del processo sia costante. La sismicità indotta viola queste assunzioni, causando eventi che seguono processi fortemente non lineari nello spazio e nel tempo. Una volta iniziata una fase di sismicità indotta per aumentati carichi da attività antropiche, l'evoluzione può essere di due tipi: 1) portando ad una diminuzione della magnitudo, del volume interessato e della frequenza delle scosse 2) causando repentini aumenti della sismicità, con scosse violente che perdurano nel tempo anche a distanza dal punto iniziale. Questo comportamento a biforcazione fa capire perché sia fondamentale monitorare con reti microsismiche le attività antropiche in grado di indurre sismicità, in modo di arrestare le cause scatenanti il prima possibile quando l'evoluzione della sequenza evolve in modo infausto. Non sempre è comunque possibile evitare evoluzioni indesiderate. Due esempi famosi riguardano le città di Basilea e Denver.

Nel 2006 a Basilea una società privata intendeva pompare acqua fredda in una zona di rocce calde e secche per stimolare la produzione di vapore geotermico per teleriscaldamento e produzione di elettricità. Il primo giorno di iniezione, dopo sole 16 ore di operatività si verificò un terremoto di magnitudo superiore a quella ritenuta sicura. L'iniezione di acqua fu immediatamente sospesa, ma nelle ore successive la sismicità continuò ad aumentare fino a produrre una scossa che causò effetti pari a $I_{EMS} = V$ /11/ costringendo la società ad un risarcimento danni di circa 7,5 M€.

Ancora più a lungo periodo e a maggiore distanza i terremoti di Denver. Nel 1964 l'esercito americano iniziò a pompare reflui in un pozzo a 3600 m di profondità nelle Montagne Rocciose. Le attività proseguirono fino al 1966, nonostante si fossero avvertite numerose scosse in una zona normalmente poco sismica. Solo nel 1965 un geologo locale convinse le autorità della connessione tra terremoti e reiniezione /12/, ma anche una volta sospese le attività di pompaggio i terremoti continuarono per altri 6 anni, rimanendo sensibili alla popolazione sino al 1968 e raggiungendo la massima magnitudo nel 1967 con tre scosse M>5 che causarono danni strutturali in edifici della città di Denver /13/. Molti altri casi nel mondo hanno evidenziato che non è possibile stabilire semplici relazioni lineari tra lo stimolo applicato e la risposta indotta, e nemmeno è possibile prevedere in anticipo, una volta iniziato il processo di propagazione di una grossa frattura, dove e quando il processo si arresterà. Risulta pertanto impossibile ri-

condurre la sismicità indotta nei tradizionali modelli di pericolosità sismica.

3.2. *Accelerazioni elevate per ridotta profondità*

Una caratteristica che rende la sismicità indotta particolarmente insidiosa è la possibilità che le scosse si verifichino molto più in prossimità della superficie rispetto a quanto accade con i terremoti tettonici. La minore profondità degli ipocentri ha come conseguenza una maggiore attenuazione allontanandosi dall'epicentro, ma anche maggiori accelerazioni e intensità macrosismiche. Un comportamento simile si ritrova in natura per i terremoti vulcanici ed è ben noto anche in Italia come sia importante utilizzare per questi terremoti delle relazioni di attenuazione e di conversione intensità-magnitudo diverse da quelle standard (si veda il recente esempio fornito dallo studio sui terremoti etnei in /14/). In alcuni paesi europei dove la sismicità indotta è più pericolosa di quella naturale si sono già avute proposte di introduzione di forme spettrali compatibili con le norme dell'Eurocodice8 /15/. Nel caso dell'Olanda, il paese più avanzato da questo punto di vista, la sismicità indotta deve essere considerata nella progettazione antisismica di impianti industriali e strutture strategiche secondo relazioni di attenuazione appositamente sviluppate /16/. Gli spettri di risposta dei terremoti indotti sono generalmente caratterizzati da un contenuto di accelerazioni in alta frequenza superiore agli spettri di norma di pari PGA di ancoraggio, come si può vedere dall'esempio tratto dal lavoro di Zembaty /15/ riportato in figura 3.

In Italia mancano del tutto informazioni riguardo le accelerazioni e le forme spettrali tipiche della sismicità indotta. Nel campo geotermico di Monte Amiata nel 2000 si verificò un terremoto di magnitudo 3.9 che causò danni strutturali in un area poco popolata, rendendo inagibili diversi casolari per un totale di 41 senzatetto. Le registrazioni della rete accelerometrica disponibili furono utilizzate per calibrare le stime di accelerazione di picco ottenute dall'analisi dei danni e delle amplificazioni di sito /17/, ottenendo valori che per 5 delle 21 località esaminate sono superiori alla accelerazione di 0.14 g prevista dalla attuale normativa sismica per l'area (Figura 4).

3.3. *Anticipo dell'occorrenza di scosse naturali*

In tempi recenti, in Italia si stanno studiando le possibilità di stoccare gas metano nel sottosuolo, prevalentemente in giacimenti esauriti. Nelle valutazioni di impatto ambientale presentate a corredo delle richieste di questi progetti, non è infrequente trovare una generale sottovalutazione della sismicità indotta, sia per aree naturalmente asismiche o sismiche. Per queste ultime talvolta ci si spinge ad considerare che una eventuale sismicità indotta non farebbe altro che limitarsi ad anticipare eventi che prima o poi sarebbero occorsi comunque. Questa considerazione è sbagliata per i motivi sopra esposti (la sismicità indotta non segue la distribuzione statistica di quella naturale, le accelerazioni sono maggiori) ma soprattutto perché il fattore tempo non può comunque essere considerato ininfluente. Gli ultimi studi sulla pericolosità sismica in Italia mostrano che per buona parte del territorio nazionale esiste un deficit di protezione dato che sono ora state classificate sismiche zone che prima non erano ritenute tali e dove quindi non si progettava in modo antisismico (Fig. 5, da /18/). Pertanto in queste aree non è auspicabile che i terremoti avvengano prima dei loro tempi naturali, dato che adeguare le abitazioni e le altre strutture strategiche (scuole, ospedali, uffici pubblici, ecc.) richiederà comunque molto tempo.

4. **Conclusioni**

In Italia gli studi sulla sismicità indotta sono in cronico ritardo rispetto al resto del mondo data la assenza di dati pubblici su questo fenomeno. Questa assenza di dati e di studi potrebbe essere confusa con la assenza del fenomeno stesso. Ciò sarebbe pericoloso in un momento in cui vi è un forte interesse per attività quali la geotermia, lo stoccaggio di metano ed il sequestro sotterraneo di anidride carbonica.

Anche in aree con bassi livelli di sismicità naturale va prevista comunque la installazione di reti microsismiche che consentano il monitoraggio della sismicità indotta. I dati di queste reti dovrebbero essere resi disponibili su siti pubblici. Nella progettazione di impianti andrebbe considerata anche la sismicità che questi possono indurre, come avviene già in altri paesi europei. La auspicabile futura disponibilità di dati anche per scosse di modesta entità potrebbe consentire di costruire relazioni di attenuazione delle accelerazioni con la distanza e di conversione magnitudo-intensità ad hoc per la sismicità indotta.

Infine le maggiori cautele andrebbero adottate in quelle aree dove le strutture esistenti risultano inadeguate sismicamente già per la sismicità naturale.

View publication stats