ITHACA Project and Capable Faults in the Po Plain (Northern Italy)

Valerio Comerci*, Anna Maria Blumetti*, Pio Di Manna*, Domenico Fiorenza*, Luca Guerrieri*, Mauro Lucarini*, Leonello Serva*, Eutizio Vittori*

SUMMARY – *The use of the term "capable fault" instead of the more generic "active fault", is to be preferred when dealing with faults, that, more than being simply active, have the capability to cut or deform the ground surface, generally in association, but not exclusively, with seismic events. Such faults are the most relevant from the societal hazard viewpoint, for the damage they can cause directly or indirectly (e.g., interaction between capable fault and high risk facilities) by offsetting the ground and by shaking (surface ruptures commonly accompany earthquakes above magnitude 6).*

Recognition of presence of capable faults and assessment of their potential for surface rupturing is fundamental in the siting process of highly hazardous and strategie structures and, more generally, in land use planning and management of infrastructures, especially during emergencies.

So, being the Italian territory crossed by a large number of potentially capable faults, more than a decade ago the ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults) project was initiated, to map and describe all faults recognized or suspected of being capable. The database, that contains more than 1,500 faults (with a wide range of variability of the level of reliability of the input data), is managed by the Geological Survey of ltaly, department of ISPRA.

In the Po Plain territory, ITHACA displays many of such structures. Despite the modest expected displacement (tens of centimeters at most) for each event along these faults, the high, and still growing, grade of human occupancy of this land makes the risk associated to seismicity and capable faulting a growing factor of anxiety. To begin a process of risk attenuation, specific norms in urban planning are needed to regulate development along capable faults, with special care when dealing with hazardous plants.

Keywords: Capable fault, seismic hazard, ITHACA project, Po Plain, urban planning.

1. Introduction

The term *active fault* is often misused in common practice to indicate the capacity of a fault to rupture the ground surface, instead of the more appropriate term *capable fault*. Just an example for all: the Eurocode 8, in part 5 (foundations), chapter 4, paragraph 4.1.2, states: *... Special geological investigations shall be carried out for urban planning purposes and for important structures to be erected near potentially active faults in areas of high seismicity, in order to determine the ensuing hazard in terms of ground rupture and the severity of ground shaking*. So, the Eurocode, added to the hazard posed by seismic shaking, refers also to the hazard from ground surface displacement caused by an active fault (surface faulting hazard). This is the realm of capable faults, which actually are a subset of active faults; hence, the term *active fault* is not a mistake, but the diffusion of the more precise definition *capable fault* would facilitate the communication regarding the issue of the specific hazard posed by surface faulting. Thanks to the continuing improvement of knowledge with the identification of a number of historical and paleoseismic events, such hazard is being more recognized also in Italy, despite the somehow lesser relevance compared to other countries (e.g., Japan, Western United States, China, Turkey).

This note illustrates the structure and content of the ITHACA (ITalian HAzard from CApable faults) database, focusing in particular on the mapped or suspected capable faults in the Po Plain.

2. Active vs. capable faults

The first scientific descriptions of active faulting date back to Gilbert /1/, following the Owens Valley earthquake in 1872 and the first definitions are already found in 1923 (Taber /2/; Willis /3/), then, among others, in 1950 (Louderback /4/), in 1965 (Allen et al. /5/), in 1970 (Bonilla /6/), in 1977 (Slemmons 17/; Slemmons and McKinney /8/). Actually, in general, despite many different criteria, a fault is taken as active if it has moved in the last millennia to tens of thousands of years ago (e.g. Iwahashi /9/).

Among active faults, only a subset of them is truly hazardous. As stated before, to indicate the faults posing a threat due to surface displacement, the term capable fault has been introduced, in origin in the procedures for the siting of nuclear installations.

The definition of capable fault is given in the specific *Safety Guide* No. SSG-9 by IAEA *(International Atomic Energy Agency) 1101*, at paragraph 8.4.

* ISPRA, lnstitute for Environmental Protection and Research – Geological Survey of ltaly, Roma, Italy, e-mail: valerio.comerci@isprambiente.it

The faults able to deform or displace the ground surface are generally associated to release of seismic energy in the crust of magnitude at least 6, more frequently larger than 6 (more rarely between 5 and 6), depending on hypocentral depth, geotectonic setting, rheology, kinematics, size of rupture area and amount of slip (Wells and Coppersmith /11/; Caputo /12/; Pavlides and Caputo /13/; Guerrieri and Vittori /14/).

So, for magnitudes starting near 6, seismogenic crustal faults, added to the hazard provoked by seismic shaking, can endanger engineering structures also by deforming the ground above which they rest, with slip growing with increasing magnitude from decimeters to meters. The hazard is confined in a narrow belt corresponding to the rupture zone, but the rupture length may reach hundreds of kilometers for magnitude above 7 (e.g., Wells and Coppersmith /11/). Moreover, also blind active faults (i.e., faults not directly reaching the ground surface), may as well be capable of deforming the ground surface (e.g., fault propagation folding), and can even activate secondary (sympathetic) ground rupturing along more superficial faults, not necessarily connected directly with the master fault.

Finally, in the volcano-tectonic setting, surface faulting can be frequent and associated to smaller magnitudes (< 5), due to small hypocentral depths, or even to aseismic slip (creep), still causing significant damage to the structures unwisely built across them, as is the case for the net of evident capable faults in the eastern side of Etna volcano (e.g., Azzaro et al. /15/).

3. Historical cases of coseismic surface faulting in Italy

Fault reactivation at surface has certainly accompanied many strong-to-moderate Italian earthquakes. Figure 1 shows the known cases of coseismic surface faulting during historical events.

For example, based on the studies by Nappi et al. (/16/, /17/ and /18/), an end-to-end rupture length (SRL) of 32 km has been estimated (Serva et al., /19/) for the June 5, 1688, Sannio earthquake; based on the research of Galli and Bosi /20/, it is possible to associate to the 1783, February 5 event, a SRL longer than 35 km; based on historical documents and geological studies along the Bojano Basin (north Matese) fault system (Guerrieri et al. /21/; Michetti et al. /22/ e /23/; Esposito et al. /24/; Porfido et al. /25/), an SRL of 40 km and an offset of 1.5 m bave been established (Serva et al. /19/); thanks to the studies by Oddone (/26/) on the January 13, 1915, Fucino earthquake, Serva et al. /27/ have identified evidence of rupture along at least two parallel fault traces (Celano-Gioia and Parasano-Cerchio), with an SRL of 23 km and slip reaching at least 0.9 m, still visible (Figure 2); the SRL of the November 23, 1980, Irpinia-Basilicata earthquake neared 40 km with an offset of 1 m (Pantosti and Valensise /28/). In addition, other faults broke the surface during the same event (Blumetti et al. /29/); also after the 6 April, 2009 L'Aquila event (local magnitude 5.9 and Mw 6.3), a continuous rupture with 10-15 cm of maximum vertical offset was observed for at least 2.6 km (Paganica fault) and possibly longer (between 7 and 19 km), linking more discontinuous traces (see Vittori et al. /30/ also for the different interpretations on SRL). Differential SAR interferometry (Guerrieri et al. /31/ and references therein) have also revealed the extension of the co- and post-seismic areal deformation in the Aterno Valley caused by the 6 April shock.

In some historical cases only the occurrence of faulting was identified, without being able to estimate the

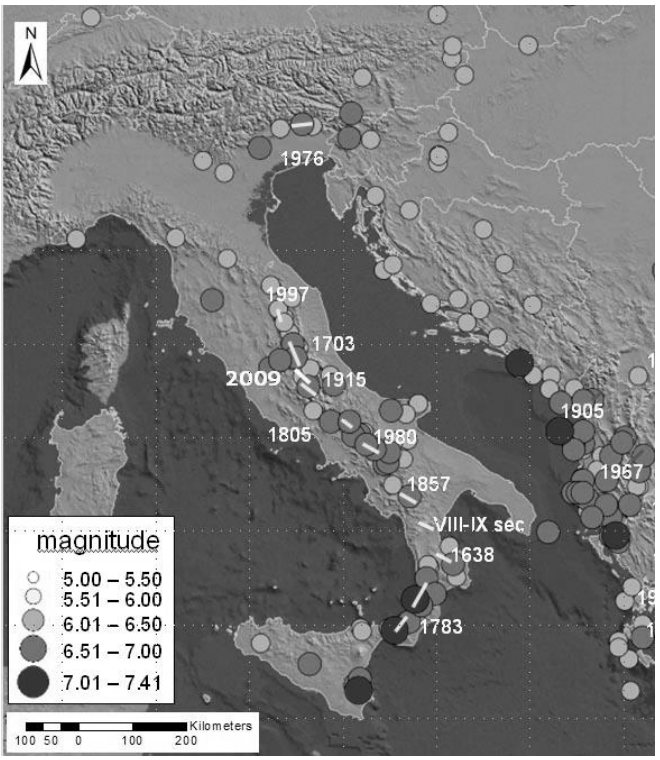

Fig. 1. *Italian historical earthquakes with ascertained or presumed surface faulting (white segments). Seismic events, after* A. *Rovida, R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi (a cura di), 2011.*
CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, http://emidius.mi.ingv.it/CPTI and ISIDe Working Group (INGV, 2010), Italian Seismological Instrumental and parametric database: http://iside.rm.ingv.it.
Terremoti storici italiani con indicazione degli eventi di fagliazione superficiale (segmenti bianchi) accertata o presunta.

Fig. 2. *The fault scarp associated to the 1915, January 13 earthquake is still visible at San Benedetto dei Marsi (AQ).*
La scarpata di faglia prodotta dal terremoto del 13 gennaio 1915 è ancora osservabile presso San Benedetto dei Marsi (AQ).

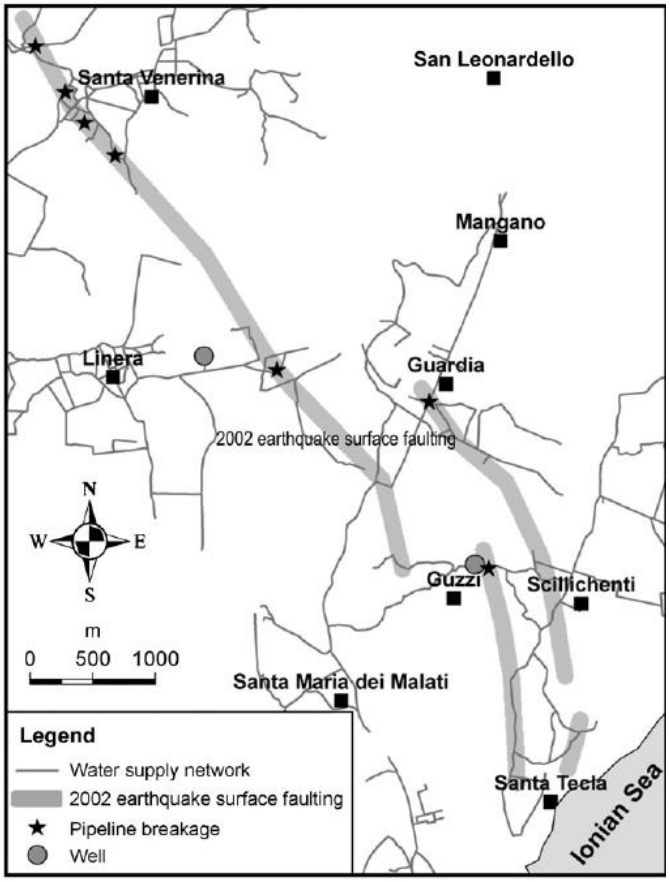

Fig. 3. *Water supply networks damaged by the coseismic Surface breaks. of the Santa Venerina earthquake on October 29, 2002 (Blumetti et al. /41/).*
Il terremoto di Santa Venerina del 29 ottobre 2002 (M 4,4) ha prodotto un esteso campo di fratturazione in superficie, che ha procurato danni alla rete idrica (da Blumetti et al. /41/).

corresponding SRL, as for the earthquakes of 1638 in Calabria (Galli and Bosi /32/) and 1694 in Irpinia-Basilicata and 1930 in Irpinia (Serva et al. /19/). In particular, it is important to underline that faults generating earthquakes of magnitude > 6-6.5, very common in the Apennines (e.g., Galli et al. /33/), are generally capable (Wells and Coppersrmith /11/; Guerrieri and Vittori /14/). Added to the documented historical cases of surface faulting, similar evidence has been found on many active tectonic structures by means of palaeoseismological studies. As an example, the trenches analyzed across the Paganica fault have revealed at least two older events of possibly larger magnitude, because of the larger offset with respect to the 2009 event (Galli et al. /34/).

Along the eastern slopes of Etna volcano (eastern Sicily), capable faults are well known; periodically (i.e., associated to low-to-moderate magnitude earthquakes of low focal depth and/or volcanic eruptions), or even continuously (creep), such faults cut roads and buildings with significant damage.

The Provenzana-Pemicana-Fiumefreddo fault system, that borders with ca. east-west trend the northern side of the volcanic apparatus and appears to have a strong gravity-driven component, moves with a mean slip-rate of 27±7 mm/a (Azzaro et al. /15/), either aseismically and seismically, causing significant damage to roads,

Fig. 4. *Example of damage produced by the surface faulting associated with the Santa Venerina earthquake to the water supply network.*
Esempio di danneggiamento prodotto dalla fagliazione superficiale, associata al terremoto di santa Venerina, alla rete di distribuzione idropotabile.

including the motorway Messina-Catania, requiring frequent maintenance works (Azzaro et al. /15/; Blumetti et al. /35/).

The faults of the Timpe system commonly move associated to earthquakes and have a strong morphological evidence, with scarps up to 120 m high (Moscarello, Acireale, San Leonardello faults), and *slip rates* up to 2-3 mm/a (Monaco et al. /36/).

In this volcanic environment, the seismic events generally occur at shallow depth (less than 2 km) thus causing surface ruptures with low magnitudes. For example, the Santa Venerina quake of October 29, 2002, (M 4.4) was associated to a fracturing zone distributed in two strips about 5 km long each one 30 meters wide (Blumetti et al. /35/), that damaged the water distribution network (Figures 3 and 4). Even during the M 3.6 right-transtensional event of May 2009 (focal depth less than 1.5 km), surface faulting with up to 5 cm of displacement took place on the northern segment of the San Leonardello fault (Azzaro et al. /37/).

4. The ITHACA Catalogue

Following the Friuli (1976) and Irpinia-Basilicata (1980) earthquakes, a new attention was given in Italy to active tectonic processes and seismicity, in particular through the *Progetto Finalizzato Geodinamica* (Finalized Geodynamic Project) of CNR, which also prompted the first mapping of active structures in Italy (Ambrosetti et al. /38/). In the second half of the 90', to respond to the need of a specific knowledge regarding the surface faulting hazard, especially for siting purposes and environmental risk assessments, the project ITHACA *(ITaly HAzard from CApable faults)* was initiated at ANPA (Italian Environmental Agency, later APAT and finally ISPRA). The project was aimed at building a tool for summarizing and making easily available information on capable faults, based on

published sources, field checks and studies *ad hoc*. The first version appeared in 2000 (Michetti et al. /23/), then followed by several updates (Di Manna et al. /39/). However, despite the efforts, it must be stressed that the work is still far from being complete and much more effort is needed to achieve a satisfactory picture. Currently, the catalog, managed by the Geological Survey (SGI) at ISPRA, is made of ca. 1500 records visible online on the SGI portal (http://sgil.isprambiente.it/GMV2/index.html). The faults in the database exhibit at least one evidence of capability among the following:

a) historical coseismic slip; b) Creep or tectonic movements, seen by geodetic, GPS, and/or satellite measurements; c) Late Pleistocene-Holocene paleoseismic evidence of slip; d) displacement of Quaternary deposits/landforms.

Moreover, faults are classified according to the deposits, in particular and/or landforms they involve: i) Latest Pleistocene-Holocene sediments and/or landforms, ii) Late Pleistocene sediments and/or landforms. Middle Pleistocene and Older Quaternary sediments and/or landforms are included as elements not to be excluded *a priori* and deserving further studies. It must be stressed that sometimes more recent deposits are absent along such fault traces, making it difficult to ascertain their actual last movement. So they have been precautionarily recorded (giving the last known age of slip), unless a dated pre-Late Pleistocene sediment clearly seals the fault. Finally, in the catalogue also buried tectonic structures are included (e.g., Boccaletti and Martelli /40/), when deemed active and able to cause deformation/dislocation of the ground surface, directly or through their splays.

Among the database parameters there are: locality fault name, kinematics, fault rank (main, secondary), geological/tectonic setting, segmentation, strike, dip, geometry, length, geomorphological evidence, paleoseismic data, lithologies, evidence for capability, last movement, slip-rate, maximum credible magnitude, evaluations of reliability of some key parameters, list of references. For a proper use, it is opportune to recall that the precision of the spatial location depends on the scale of mapping, which is given in the database.

Far from being complete, today this database is a useful knowledge tool either of the location and physical parameters characterizing the hazard related to a number of capable faults in the Italian territory, so densely inhabited and industrialized. In particular, ITHACA can serve the scientific research in the investigation of geodynamic processes and contributes to: a) natural and seismic hazard assessments; b) understanding of the recent evolution of landscape, c) land use planning, d) management of seismic emergencies. Finally, it finds its application in the microzonation studies. Since 2010, the Latium Region administration has foreseen in its guidelines for the practical use of the general criteria for seismic microzonation studies in the territory of Lazio Region (D.G.R. nr. 545), that the professional consultants, when dealing with active/capable faults, must refer to the products of the ITHACA project. Following the requirements in the *Guidelines and General Criteria for Seismic Microzonation* (/41/), it is necessary to focus on the faults in ITHACA with proven reactivation within the last 40,000 years. Based on an agreement between ISPRA and the Regional Geologic and seismic Office of the Latium Region administration, the latter will provide such capable faults to professionals, extracted from the ITHACA catalogue.

Data have been recently updated for the regions Lazio, Abruzzo, Calabria, Sicily and, regarding northern Italy, in several sectors of southern Alps (Friuli and Lombardy). While the former is well recognized as a region of high seismicity, the same cannot be said for the latter, although recent studies (Livio et al. /42/) have suggested also here a far from negligible level of seismic hazard, to which a very high level of risk is associated for the intense human presence.

5. Capable faults in the Po Plain

Although not among the territories of highest seisrnic hazard in Italy, still the Po Plain is far from being safe with respect to coseismic surface faulting. In fact, it is bordered by active compressional structures either on the Alpine and the Apenninic sides, mostly south-verging thrusts and northeast-verging thrusts, respectively. Many Quaternary thrusts, buried under the plain itself, are imaged by the dense network of seismic lines (e.g., Pieri and Groppi /43/).

The historical evidence of seismicity confirms such activity in the plain: macroseismic intensities (MCS) have reached the IX-X degree in 778 AD (Treviso), IX degree on January 2-3, 1117 (Veronese), IX degree on December 25, 1222 (Brescia), X degree on February 25, 1695 (Asolo, TV), IX degree on June 7, 1891 (Valle d'Illasi , Verona).

Although the regional subsidence rate is higher than the uplift rate of the Apenninic accretion wedge (Doglioni /44/; Doglioni and Prosser /45/; Carminati and Di Donato /46/), so that the growth structures are buried under a thick cover of sediments (Carminati et al. /47/; Vittori and Ventura /48/), some fold/fault structures come to the surface or very near it, deforming the ground floor.

In ITHACA, many reverse faults capable of causing surface ruptures or deformation are listed (derived from the neotectonic studies published in the last decades), pertaining to both the Alpine and Apenninic domains (Figure 5). An example is the Mirandola structure (Modena), a *thrust-related fold* part of the Ferrarese Arc, whose surface evidence is given by gently undulated relief and the deflection of the Secchia and Panaro river beds (Castaldini et al. /49/; Burrato et al. /50/). Scrocca et al. /51/ have reconstructed the rate of tectonic uplift of such anticline since the Middle Pleistocene: despite a progressive decline of the uplift rate, still a rate of 0.16 mm/a is evident for the last 125 ka.

Similarly, along the Sudalpine foothills, several hills have been attributed to folding related to buried north-verging back-thrusts (Figure 6). Livio et al. /42/, based

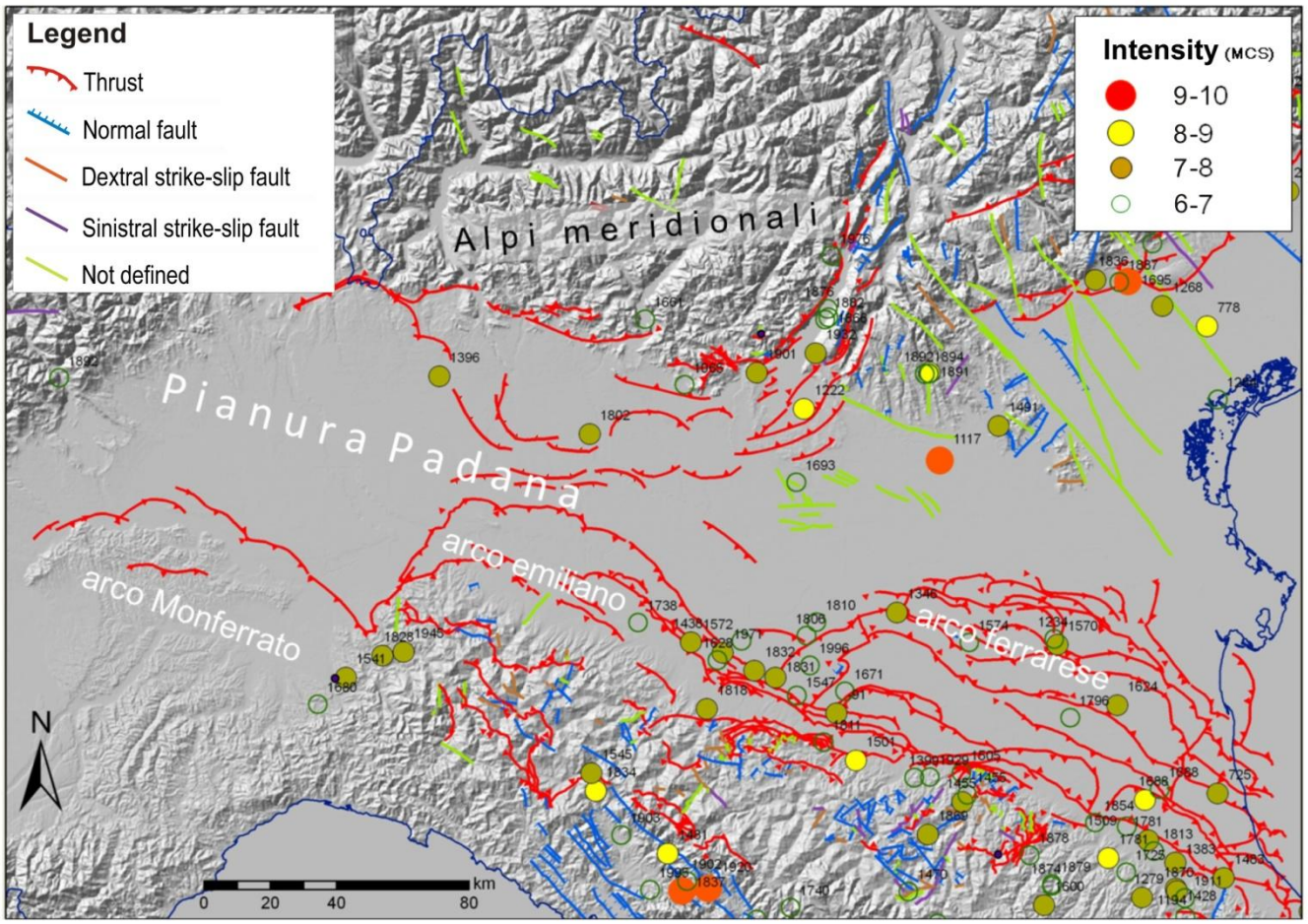

Fig. 5. *Capable faults and Pleistocene tectonic structures located in the Po Plain (ITHACA catalogue). Even if most of these active structures are buried under Quaternary deposits, they are reported here because are deemed capable of propagating the fracture or the deformation up to the surface during strong earthquakes (based on empirical relationships, e.g. Wells and Coppersmith /18/ or Pavlides and Caputo /20/. The historical earthquakes with intensity MCS larger than 6 are also located.*

Stralcio cartografico del catalogo ITHACA con le faglie capaci e le strutture tettoniche Pleistoceniche presenti in Pianura Padana. Tali strutture attive risultano coperte da depositi quaternari. Per alcune di esse ne è stata dimostrata la capacità, mentre per molte altre sarebbero necessarie indagini mirate a determinarne sia l'età dell'ultima attivazione che la capacità (o meno) di raggiungere la superficie. Sulla base di relazioni empiriche (e.g. Wells e Coppersmith /18/ o Pavlides e Caputo /20/), in occasione di eventuali forti terremoti, potrebbero indurre rottura o deformazione in superficie. Sono indicati anche i terremoti storici di intensità MCS superiore a 6.

on the reinterpretation of commercial reflection seismic profiles, have recognized a belt of fault-propagation folds, 10-20 km long, deforming the Plio-Pleistocene marine-continental clastic sequence. The fold just south of the Castenedolo hill (Province of Brescia) is a typical example of the tectonic style dominating the present-day activity (Figure 6). Another example is near the Ciliverghe Hill (Brescia), where Baroni and Cremaschi /52/ have found evidence of the tectonic control of stratigraphy and morphology during the Pleistocene. Near Monte Netto, at the top of the Capriano del Colle Hill (Figure 6), Livio et al. /53/ report the presence of normal faults above the culmination of a secondary fold, which have displaced the Late-Pleistocene-Holocene cover emerging at surface.

Being the sedimentation rates in the Po Plain up to ten times higher than the deformation rates of the active thrusts (see also Livio et al. /42/ and Livio et al. /53/), the latter remain generally buried and masked or very subdued at surface. However, the lack of surface evidence should not induce to overlook the coseismic surface rupture/deformation hazard, especially taking into account the extreme exposure of the region. An illuminating example is the distribution in the region of industrial plants classified as undergoing the risk of relevant incident (generally of chemical nature, data updated to April 2011, MATTM /54/). Of the 1101 Italian plants, more than 500 are located in the Po Plain (283 in Lombardy, 103 in Veneto, 99 in Emilia Romagna and 97 in Piedmont). The network of oil and gas pipelines is also pervasive. So, though often not the most stringent hazard (flooding is often the first source of hazard in the plain), surface faulting should be appropriately considered in the siting process for the severity of damage it can cause, as common practice for other high hazardous plants (e.g., nuclear installations, LNG terminals). As well, the chance that a capable fault crosses a urban area is far from negligible. To substantiate this point, the Lombardy region is taken here as an example. By overlapping

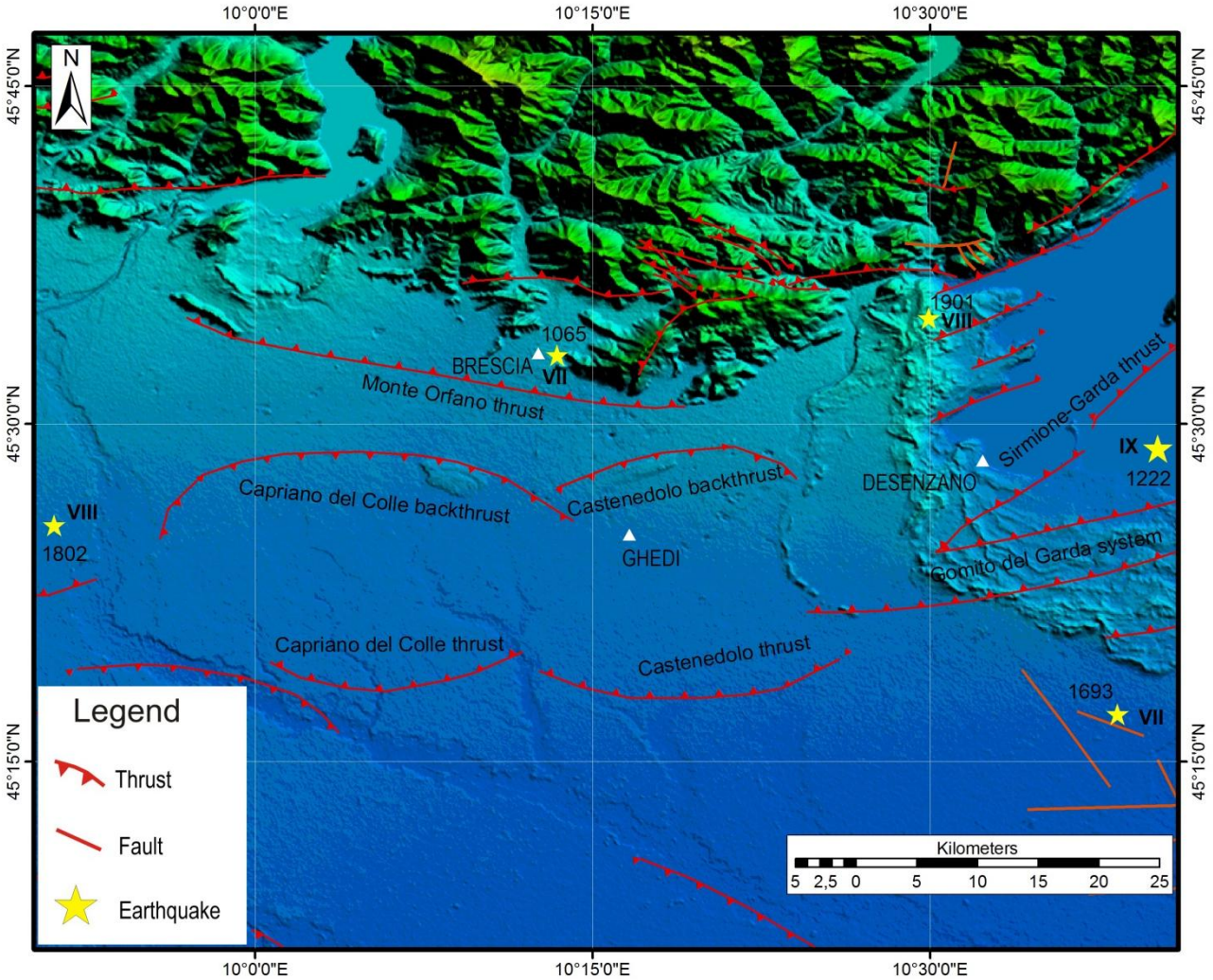

Fig. 6. *The North-verging back-thrust of Capriano del Colle and Castenedolo produced hilly reliefs. Evidence of surface faulting was identified in a quarry wall at Monte Netto (Capriano del Colle- BS; Livio et al. /60/).*
I retroscorrimenti Nord-vergenti di Capriano del Colle e di Castenedolo hanno generato in superficie dei rilievi collinari. A Monte Netto (Capriano del Colle- BS), in un fronte di cava, sono state individuate evidenze di fagliazione superficiale (vedi Livio et al. /60/).

the CORINE Land Cover 2006 data and the currently mapped capable faults (Figure 7a), it appears that civil constructions are almost always present within 200 m of distance from any mapped fault line (Figures 7b). Such width of the belt is large enough to include the uncertainties in actual fault location, also considering that generally the fault rupture is not confined to a single trace, but distributed in a zone of varying width. Scientific studies are underway in order to define the zones around the surface traces of active faults within which fault rupture hazard may occur (Boncio et al. /55/).

Figure 7c shows that the faults now mapped in ITHACA and the urban areas (year 2006) bave many intersection points. However, it must be underlined that many of such fauits still Jack the appropriate specific studies needed to confirm their capability to break or deform the ground surface.

Guerrieri et al. /56/ have defined specific indicators that quantify the exposition level to surface faulting of urban areas close to capable faults and have made an analysis to pinpoint the areas most critical in Italy. In general, the resulting level of exposition in the Po Piain is not neglectable, although it does not reach the critical values of the eastern Sicily and the Tyrrhenian side of Calabria. Indeed, the historical seismicity data (e.g., the 1117 earthquake) and the empirical relationships of Wells and Coppersmith /11/ and Pavlides and Caputo /13/ suggest that, locally, the coseismic surface displacements might reach tens of centimeters. Moreover, the intense occupation of land leads to a medium-high level of criticality in the Po Plain region (Guerrieri et al. /56/).

Indeed, according to Regione Lombardia /57/, the artificial surfaces in Lombardy (now the 14.1% of the whole territory) have grown from 1999 to 2007 of 34,165 hectares (11.3%). Such increase is mostly due to the expansion of areas classified as "commercial", "services" and "construction sites of great infrastructures". Also the increase of residential areas has been strong, particularly in minor settlements and the hinterland (Regione Lombardia /57/).

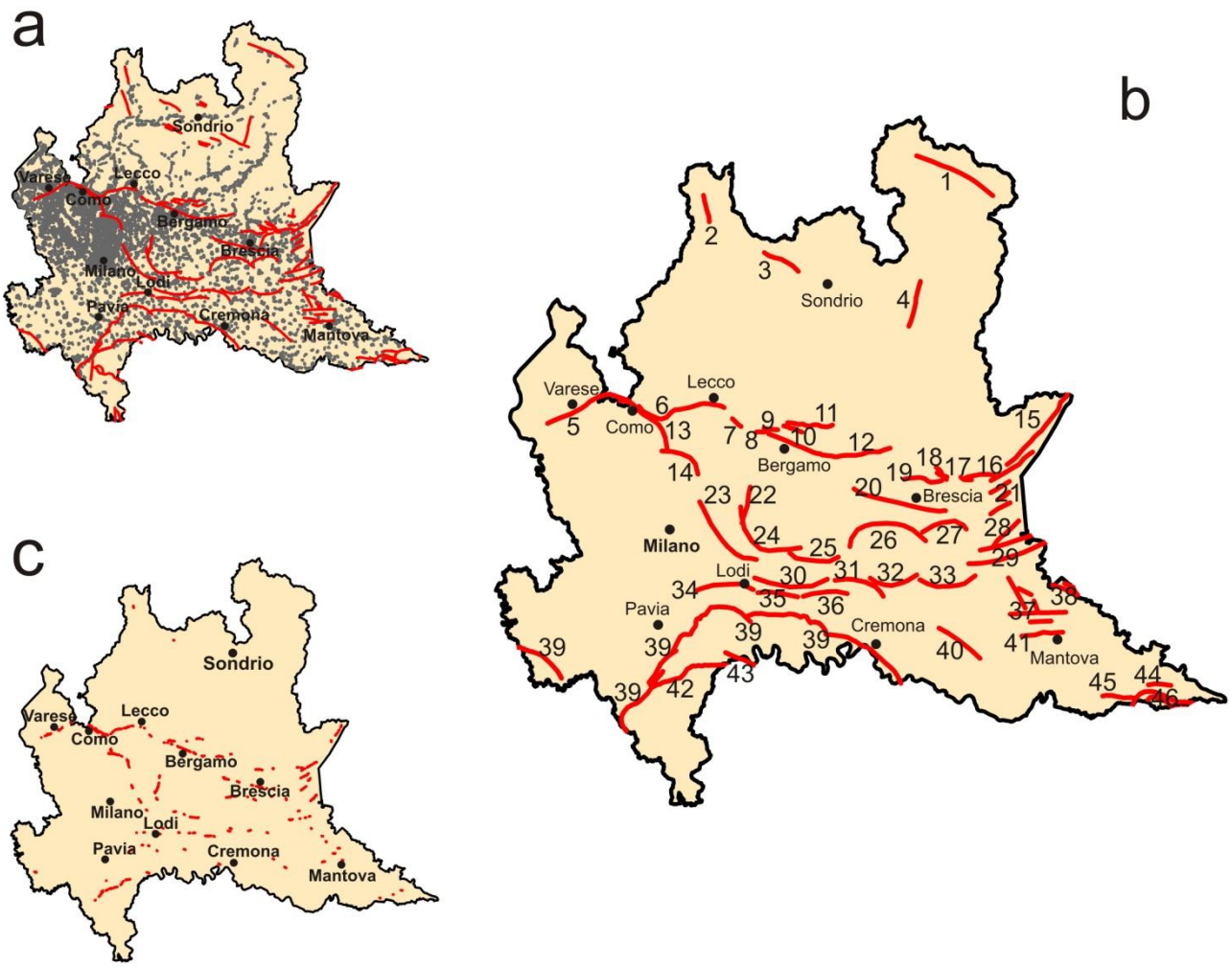

Fig. 7. *a) Capable faults and Pleistocene tectonic structures from ITHACA and urbanized areas in Lombardy (CORINE Land Cover 2006). b) Capable faults and Pleistocene tectonic structures less than 200 m far from urbanized areas. c) Intersection between capable faults and Pleistocene tectonic structures and urbanized areas.*

a) Faglie Capaci e strutture tettoniche Pleistoceniche (da ITHACA), sovrapposte alle aree urbanizzate in Lombardia (da CORINE Land Cover 2006).
b) Le faglie capaci e le strutture Pleistoceniche nel cui intorno di 200 m ricadono aree urbanizzate: 1 – Bormio, 2 – Val S. Giacomo, 3 – M. Gruf, 4 – M. Bognavisio, 5– M. Campo dei Fiori, 6– Albese con Cassano, 7– M. Marenzo, 8– Almenno, 9– Villa d'Alme, 10– Alzano, 11 – Albino, 12 – Seriate-Sarnico, 13 – Retroscorrimento di Monte Olimpino, 14– Retroscorrimento di Monza-Brianza, 15 – Giudicarie Sud, 16 – Riviera Gardesana, 17 –Caschino, 18 – M. Conche e M. Razzolo, 19 – Nave-Gussago, 20-M. Orfano, 21 – Garda, 22- Cassano d'Adda, 23 – Cernusco, 24- Treviglio, 25 – Soncino, 26 – Capriano del Colle, 27 – Retroscorrimento di Castenedolo, 28 – Sirmione-Garda, 29 – Gomito del Garda, 30 – Crema, 31 – Manerbio, 32 – Sovrascorrimento di Capriano del Colle, 33 – Sovrascorrimento di Castenedolo, 34- Lodi, 35 -Cavenago d'Adda, 36- Soresina, 37 – Sistema di Mantova, 38 – Sanguinetto, 39 – Sistema Torino-Cremona, 40 – Piadena, 41 – Laghi di Mantova, 42 – Broni Stradell, 43 – Piacenza Po, 44 – Poggio Rusco, 45 – Vallalta, 46 – Arco Ferrarese.
c) Intersezione di faglie capaci e strutture tettoniche Pleistoceniche con aree urbanizzate.

So, because of the generalized continuous urban and infrastructural development, the risk from capable faulting is doomed to grow with time. So, it appears urgent to introduce specific regulations in planning, siting and design procedures to proper address this issue.

6. Conclusions

Among active faults, identified as those that can move now, commonly producing seismic events, capable faults make the subset most relevant for the society, having the maximum associated potential for damage, either by shaking (they generally correspond to the largest crustal seismogenic sources) and surface break/deformation. Hence, the use of the term capable fault must be encouraged, e.g. following the definition given by IAEA /10/, to better the effectiveness and precision of communication in the field of seismic/tectonic hazard.

The ITHACA *(ITaly HAzard from CApable faults)* project, which is being carried out for more than a decade by the Geological Survey of Italy-ISPRA, aims at cataloging and mapping capable faults in the Italian territory. The base of data is periodically updated, following the continuous progress of knowledge. The Ital-

ian territory is characterized by many active faults able to cause deformation/surface rupture during earthquakes of magnitude al least 6. Slip can occur for magnitudes much lower in the volcano-tectonic environment, or even aseismically, as it happens in the Etna region.

Also the Po Plain is affected by capable faults that, despite the subdued evidence and modest slip rates, lead to a relevant risk because of the dense population and industrial/infrastructural network. To avoid that the risk from this hazard continues to grow because the urban/industrial sprawl remains unaware of it, it should be necessary the introduction in the urban planning of specific measures/regulations aimed at limiting/impeding construction in correspondence of capable faults, as already common practice in countries like Japan and USA, to cite the most advanced ones, where constructions are avoided within a given distance from the evidence of capable faulting, following specific and detailed studies. At the same time, the precise identification of capable faults should lead to actions aimed at reducing the risk along already present hazardous plants and lifelines.

References

/1/ Gilbert G.K. (1884). A theory of earthquakes of the Great Basin with a practical application. Am. J. Sci. 3rd Ser., 27, 49.

/2/ Taber S. (1923) Same criteria used in recognizing active faults: Geological Society of America Bulletin, v. 34, p. 661-668.

/3/ Willis B. (1923) A fault map of California. Seismological Society of America Bulletin, v. 13, p. 1-12 + map.

/4/ Louderback G.D. (1950). Faults and engineering geology: in Paige, S. (chmn), Application of Geology to Engineering Practice. Geological Society of America. Berkeley, p. 125-150.

/5/ Allen C.R., Amand P.ST., Richter C.F. and Nordquist J.M. (1965). Relationship between seismicity and geologie structure in the Southern California region. Bulletin of the Seismological Society of America, August 1965, v. 55, no.4, p. 753-797.

/6/ Bonilla M.G. (1970). Surface faulting and related effects. In: Earthquake Engineering, R.L.Wiegel, ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 47-74.

/7/ Slemmons D.B. (1977). State-of-the-art for assessing earthquake hazard in the United States: Report 6, Faults and Earthquakes Magnitude for US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 129 p.

/8/ Slemmons D.B., McKinney R. (1977). Definition of "Active Fault". US Army Engineer Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper S-77-8, 22 p.

/9/ Iwahashi J. (2010). 1:25,000-scale Active Fault Map in Urban Areas published by GSI. Bulletin of Geospatial Information Authority of Japan, Vol. 58 December, 2010.

/10/ IAEA (2010). Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations Specific Safety Guide. Series No. SSG-9, September 15, 2010. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1448_web.pdf.

/11/ Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seismol. Soc. Am. 84, 974-1002.

/12/ Caputo R. (2005). Ground effects of large morphogenic earthquakes. Journal of Geodynamics. In: Caputo R., Chatzipetros and Papadopoulos G. (Eds.), Ground effects of large morphogenic earthquakes, 40, 113-118.

/13/ Pavlides S. and Caputo R. (2004). Magnitude versus faults' surface parameters: quantitative relationships from the Aegean Region. Tectonophysics, 380, 3-4, 159-188, doi: 10.1016/j.tecto.2003.09.019.

114/ Guerrieri L. and Vittori E. (Eds.) (2007). Intensity Scale ESI 2007. Mem. Deser. Carta Geologica d'Italia, 74, Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Rome, Italy.

/15/ Azzaro R., Ferreli L., Michetti A.M., Serva L. and Vittori E. (1998). Environmental Hazard of Capable Faults: The Case of the Pernicana Fault (Mt. Etna, Sicily). Natura! Hazards 17: 147-162, 1998.

/16/ Nappi R., Alessio G., Bellucci Sessa E., Vilardo G. (2006). Analisi integrate di dati geofisici, geomorfologici e morfometrici dell'area sorgente relative al terremoto del 5 giugno 1688 (Sannio) in ambiente GIS, per l'identificazione delle deformazioni indotte. Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Congresso Nazionale (25), Roma, pp. 50-53.

/17/ Nappi R., Alessio G., Bellucci Sessa E., Vilardo G. (2007). Analisi integrata di dati geofisici e morfometrici dell'areain ambiente GIS applicata ad aree tettonicamente attive come contributo alla valutazione dei rischi ambientali. In: Second Convention, Associazione Italiana di Geografia Fisica e Geomorfologia, Torino, abstract.

/18/ Nappi R., Alessio G., Bronzino G., Terranova C. and Vilardo G. (2007). Contribution of the SIS-Cam Web-based GIS to the seismotectonic study of Campania (Southern Apennines): an example of application to the Sannio-area. Natural Hazards, 45 (1), 73-85, doi: 10.1007/s11069-007-9170-x.

/19/ Serva, L., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Vittori E. and Comerci V. (2007). Environmental effects from five historical earthquakes in southern Apennines (Italy) and macroseismic intensity assessment: Contribution to INQUA EEE Scale Project, Quaternary International 173-174, 30-44, doi:10.1016/j.quaint.2007.03.015.

/20/ Galli P., and Bosi V. (2002). Paleoseismology along the Cittanova fault: Implications for seismotectonics and earthquake recurrence in Calabria (southern Italy), J. Geophys. Res., 107(B3), 2044, doi:10.1029/2001JB000234.

/21/ Guerrieri L., Scarascia Mugnozza G. and Vittori E. (2000). Analisi stratigrafica e geomorfologica della conoide tardoquaternaria di Campochiaro ed

implicazioni per la conca di Bojano in Molise. Il Quaternario 12 (2), 119-129.
/22/ Michetti A.M., Blumetti A.M., Esposito E., Ferreli L., Guerrieri L., Porfido S., Serva L. and Vittori E. (2000). Earthquake Ground Effects and Seismic Hazard Assessment in Italy examples from the Matese and Irpinia areas, Southern Apennines'. In: Active Fault Research for the New Millennium, Proceedings of the Hokudan Symposium and School on Active Faulting, Hokudan , Japan, pp. 279-284.
/23/ Michetti A.M., Serva L. and Vittori E. (2000). ITHACA-Italy Hazard from Capable faults. In: The 31st International Geologica!Congress, Abstract + CD, Rio de Janeiro, Brasile, luglio 2000.
/24/ Esposito E., Pece R., Porfido S. and Tranfaglia G. (2001). Hydrological anomalies connected to earthquakes in Southern Apennines (ltaly). Natural Hazards and Earth System Sciences l, 137-144.
/25/ Porfido S., Esposito E., Michetti A.M., Blumetti A.M., Vittori E., Tranfaglia G., Guerrieri L., Ferreli L. and Serva L. (2002). The geologica] evidence for earthquakes induced effects in the Southern Apennines (Italy). Surveys in Geophysics 23, 529-562.
/26/ Oddone E. (1915). Gli elementi fisici del grande terremoto marsicana fucense del 13 gennaio 1915. Boll. Soc. Sismol. It., 19, 71-215.
/27/ Serva L., Blumetti A.M. and Michetti A.M. (1986). Gli effetti sul terreno del terremoto del Fucino (13 Gennaio 1915); tentativo di interpretazione della evoluzione tettonica recente di alcune strutture. Mem. Soc. Geol. Ital. 35, 893-907.
/28/ Pantosti D. and Valensise G. (1993). Paleoseismology along the 1980 surface rupture of the Irpinia Fault: implications for earthquake recurrence in the Southern Apennines, Italy. Journal of Geophysical Research 98 (B4), 6562-6577.
/29/ Blumetti A.M., Esposito E., Ferreli L., Michetti A.M., Porfido S., Serva L. and Vittori E. (2003). New data and reinterpretation on the November 23, 1980, M 6.9 Irpinia-Lucania earthquake (Southern Apennines) coseismic surface effects, in F. Dramis, P. Farabollini and P. Molin, eds., International Workshop "Large-scale vertical movements and related gravitational processes". Studi Geologici Camerti, Numero Speciale 2002, 19-27.
/30/ Vittori E., Di Manna P., Blumetti A.M., Comerci V., Guerrieri L., Esposito E., Michetti A.M., Porfido S., Piccardi L., Roberts G.P., Berlusconi A., Livio F., Sileo G., Wilkinson M., McCaffrey K.J.W., Phillips R.J., and Cowie P.A. (2011). Surface Faulting of the 6 Aprii 2009 Mw 6.3 L'Aquila Earthquake in Central Italy. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 4, pp. 26, August 2011, doi: 10.1785/0120100140.
/31/ Guerrieri L., Baer G., Hamiel Y., Amit R., Blumetti A.M., Comerci V., Di Manna P., Michetti A.M., Salamon A., Mushkin A., Sileo G. and Vittori E. (2010). InSAR data as a field guide for mapping minor earthquake surface ruptures: Ground displacements along the Paganica Fault during the 6 April 2009 L'Aquila earthquake. J. Geophys. Res., 115, B12331, doi: 10.1029/2010JB007579.
/32/ Galli P. and Bosi V. (2003). Catastrophic 1638 earthquakes in Calabria (southern Italy): New insights from paleoseismological investigation, J. Geophys. Res., 108(Bl), 2004, doi:10.1029/2001JB001713.
/33/ Galli P., Galadini F. and Pantosti D. (2008). Twenty years of paleoseismology in Italy. Earth-Science Reviews, 88(1-2), 89-117,doi:10.1016/j.earscirev.2008.01.001.
/34/ Galli P., Giaccio B. and Messina P. (2010). The 2009 central Italy earthquake seen through 0.5 Myr-long tectonic history of the L'Aquila faults system. Quaternary Science Reviews, v. 29, iss. 27-28, p. 3768-3789.
/35/ Blumetti A.M., Di Manna P., Ferreli L., Fiorenza D. and Vittori E. (2007). Reduction of environmental risk from capable faults: The case of the Eastern Etna region (eastern Sicily, Italy). Quaternary International (2007), doi:10.1016/j.quaint.2007.05.010
/36/ Monaco C., Tapponnier P., Tortorici L. and Gillot P.Y. (1997). Late Quaternary slip rates on the Acireale-Piedimonte normal faults and tectonic origin of Mt Etna (Sicily). Earth and Planetary Sciences Letters 147, 125-139.
/37/ Azzaro R., Bonforte A., D'Amico S., Guglielmino F., Puglisi G. and Scarfi L. (2010). Il terremoto etneo del 13 maggio 2009 e la faglia di S. Leonardello: un approccio multidisciplinare per lo studio della sorgente. Abstract, GNGTS 2010, Prato.
/38/ Ambrosetti P., Bartolini C., Bosi C., Carraro F., Ciaranfi N., Panizza M., Papani G., Vezzani L. and Zanferrari A. (1987). Neotectonic Map of Italy (Scale 1 :500.000). C.N.R., P. F. Geodinamica.
/39/ Di Manna P., Blumetti A.M., Fiorenza D., Ferreli L., Giardina F., Michetti A.M., Serva L. and Vittori E. (2006). ITHACA (version 2006): new data on capable faults in Italy. ECONGEO 2006 – Barcellona 13-16 giugno 2006 – vol. abstracts.
/40/ Boccaletti M. and Martelli L. (Eds.) (2004). Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna. Scala 1:250.000. RER, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Edizioni S.E.L.C.A.
/41/ Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome, 2008, Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica, Dipartimento della Protezione Civile, pp. 515.
/42/ Livio F., Michetti A.M., Sileo G., Carcano C., Mueller K., Rogledi S., Serva L., Vittori E. and Berlusconi A. (2009). Quaternary capable folds and seismic hazard in Lombardia (Northern Italy): the Castenedolo structure near Brescia. Ital.J.Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.), Vol. 128, No. 1 (2009), pp. 191-200.
/43/ Pieri M. and Groppi G. (1981). Subsurface geological structure of the Po plain, Italy. Progetto Finalizzato Geodinamica-Agip n. 414.
/44/ Doglioni C. (1993). Some remarks on the origin of foredeeps. Tectonophysics, 228, 1-2, 1-20.

/45/ Doglioni C. and Prosser G. (1997). Fold uplift versus regional subsidence and sedimentation rate. Marine and Petroleum Geology 14(2), 179-190.

/46/ Carminati E. and Di Donato G. (1999). Separating natural and anthropogenic vertical movements in fast subsiding areas: the Po plain (N. ltaly) case. Geophys Res Lett 26, 2291-2294.

/47/ Carminati E., Doglioni C. and Scrocca D. (2003). Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy). Geophys. Res. Lett. 30(13), 1717, doi:10.1029/2003GL017001.

/48/ Vittori E. and Ventura G. (1995). Grain size of fluvial deposits and late Quaternary climate: a case study in the Po River valley (Italy). G.S.A. Geology v. 23, n. 8, p. 735-738.

/49/ Castaldini D., Gasperi G., Panizza M. e Pellegrini M. (1979). Neotettonica dei Fogli 74 (Reggio nell'Emilia) (p.p.) e 75 (Mirandola) nell'intervallo da 18.000 B.P. ali' Attuale (interv. V). CNR Progetto Finalizzato Geodinamica, Nuovi contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica di Italia, Pubbl. n. 251, pp. 317-332.

/50/ Burrato P., Ciucci F. and Valensise G. (2003). An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern ltaly: evidence for active blind thrust faulting. Annals of Geophysics, 46 (5), 865-882.

/51/ Scrocca D., Carminati E., Doglioni C. and Marcantoni D. (2007). Slab retreat and active shortening along the central-northern Apennines, in Thrust Belts and Foreland Basins: From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems, Frontiers in Earth Sciences, edited by O. Lacombe et al., pp. 471-487, Springer, Berlin.

/52/ Baroni C. and Cremaschi M. (1986). Geologia e pedostratigrafia della Collina di Ciliverghe (Brescia). Natura Bresciana., Ann. Mus. Civ. Sci. Nat., 23, 55-78.

/53/ Livio F., Berlusconi A., Michetti A.M., Sileo G., Zerboni A., Trombino L., Cremaschi M., Mueller K., Vittori E., Carcano C. and Rogledi S. (2009). Acrive fault-related folding in the epicentral area of the December 25, 1222 (Io = IX MCS) Brescia earthquake (Northern Italy): Seismotectonic implications. Tectonophysics, 476, 320-335.

/54/ MATTM (2011). http://www.minambiente.it/menu/menu_attivita!Inventario_Nazionale_degli_Stabilimenti_.html.

/55/ Boncio P., Galli P., Naso G., Pizzi A. (2010). Surface faulting across inhabited areas during the L'Aquila 2009 earthquake (MW 6.3): implications for surface fault rupture hazard zoning in Italy. Abstract, GNGTS 2010, Prato.

/56/ Guerrieri L., Blumetti A.M., Di Manna P., Serva L. and Vittori E. (2009). The exposure of urban areas to surface faulting hazard in Italy: a quantitative analysis. Boli. Soc. Geol. It. (Ital. J. Geosci.), Vol. 128, No. 1 (2009).

/57/ Regione Lombardia, 2010, Uso del suolo in Regione Lombardia. I dati Dusaf. Edizione 2010. http://www.cartografia.regione.lombardia.it.

Il Progetto ITHACA e le Faglie Capaci della Pianura Padana

V. Comerci*, A.M. Blumetti*, P. Di Manna*, D. Fiorenza*, L. Guerrieri*, M. Lucarini*, L. Serva*, E. Vittori*

SOMMARIO – *L'uso del termine "faglia capace" è da preferire al più generico "faglia attiva" nei* casi *di faglie in grado di dislocare e/o deformare la superficie topografica, in occasione di eventi sismici di magnitudo, in genere, medio-elevata. La capacità di tali faglie di dislocare i terreni di fondazione, con rigetti decimetrici* o *addirittura metrici, può determinare un impatto severo sulle infrastrutture e sul tessuto industriale e urbano (in particolare* su *impianti* a *rischio di incidente rilevante, oleodotti, gasdotti, ecc.), e costituisce perciò un criterio di esclusione di siti ad alto rischio, quali centrali nucleari, rigassificatori, depositi di stoccaggio di materiale radioattivo (vedi guide tecniche IAEA). La dettagliata caratterizzazione delle faglie capaci sul territorio italiano è l'obbiettivo del progetto ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults), in corso di sviluppo da oltre 10 anni. Attualmente il relativo catalogo, gestito ed aggiornato dal Servizio Geologico d'Italia – ISPRA, contiene dati riguardanti circa 1500 faglie, tra i quali geometria, cinematica, età dell'ultima attivazione accertata, rigetto* atteso, *inclusa anche una valutazione dell'affidabilità dei dati* stessi, *derivati in gran parte dalla letteratura scientifica più recente e da studi specifici. Nel catalogo* sono *riportate, oltre alle faglie capaci accertate, anche strutture tettoniche pleistoceniche, talvolta sepolte (come nel* caso *della Pianura Padano-Veneta), comunque sospettate di poter indurre deformazione in superficie. [esecuzione di precise indagini ad hoc è l'unico strumento per cercare di colmare le obbiettive lacune conoscitive relative alla effettiva capacità di tali strutture.* Come *ha dimostrato, ad esempio, il terremoto di L'Aquila del* 2009, *anche un rigetto cosismico di un decimetro può contribuire ad aumentare sensibilmente il danneggiamento. Pertanto il rischio nel territorio padano risulta tutt'altro che trascurabile e destinato ad aumentare,* a causa *dell'elevata antropizzazione in continua espansione. In un'ottica di riduzione del rischio,* si *propone quindi di introdurre, nella pianificazione territoriale, specifiche norme finalizzate* a *regolamentare l'espansione urbana e, soprattutto, la costruzione di impianti* a *rischio di incidente rilevante in aree attraversate da faglie capaci.*

Parole chiave: faglia capace, pericolosità sismica, *Progetto ITHACA, Pianura Padana, pianificazione territoriale.*

1. Introduzione

Il termine faglia attiva viene spesso impropriamente utilizzato per indicare la capacità di una faglia di rompere la superficie del terreno; esso viene in pratica utilizzato al posto del termine faglia capace. Un esempio per tutti, l'Eurocodice 8, nella parte 5 (Fondazioni), al Capitolo 4, Paragrafo 4.1.2 recita: ... *Special geological investigations shall be carried out for urban planning purposes and for important structures to be erected near potentially active faults in areas of high seismicity, in order to determine the ensuing hazard in terms of ground rupture and the severity of ground shaking.* Pertanto, l'Eurocodice, oltre alla pericolosità sismica dovuta allo scuotimento, fa riferimento alla pericolosità da rottura del terreno in superficie a causa di una faglia attiva (pericolosità da fagliazione superficiale o *surface faulting hazard).* Le faglie capaci fanno parte delle faglie attive, quindi l'uso *estensivo* del termine faglia attiva non è errato, ma una maggiore diffusione dell'uso del termine faglia capace renderebbe più chiara, oltre che più corretta, la comunicazione inerente il tema del pericolo da fagliazione superficiale.

Di tale pericolo, grazie alle conoscenze sempre più approfondite, si sta prendendo coscienza anche in Italia, dove, pur risultando minore rispetto a paesi molto più esposti, come ad esempio il Giappone, parte degli USA, Cina o, per rimanere in Europa, la Grecia o la Turchia, comunque esiste un cospicuo elenco di casi storici e pre-storici (paleosismologici).

Nella presente nota vengono presentati la struttura e il contenuto del catalogo ITHACA (ITalian HAzard from CApable faults) con particolare riferimento alle faglie capaci e alle strutture tettoniche pleistoceniche in Pianura Padana.

2. Faglie Attive vs Faglie Capaci

La prima descrizione scientifica di faglia attiva fu fatta da Gilbert /1/ a seguito del terremoto del 1872 in Owens Valley (California) e le prime definizioni risalgono già al 1923 (Taber /2/; Willis /3/); si ricordano, poi, quelle di Louderback /4/ del 1950, di Allen et al. /5/ del 1965, di Bonilla /6/ del 1970, di Slemmons /7/ e di Slemmons e McKinney /8/ del 1977. Generalmente una faglia viene considerata attiva se si è "attivata" nelle ultime migliaia o decine di migliaia di anni (e.g. Iwahashi /9/).

Tra tutte le faglie attive, comunque, solo una parte di esse risulta effettivamente pericolosa.

Per indicare solo le faglie attive che sono rilevanti dal punto di vista degli effetti che inducono direttamente in superficie, è stato introdotto, in origine, nelle procedure per l'individuazione di siti idonei alla costruzione di impianti nucleari *(siting),* il termine "faglia capace". Per la definizione, si rimanda al paragrafo 8.4 della *Specific Safety Guide* No. SSG-9 della IAEA *(International Atomic Energy Agency)* /10/.

Le faglie che riescono a produrre deformazione e/o dislocazione in superficie, o in prossimità di essa, sono generalmente associate a rilasci di energia sismica in ambiente crostale di magnitudo almeno pari o superiore a 6 e, più raramente, anche a terremoti superficiali di magnitudo tra 5 e 6 (Wells e Coppersmith /11/; Caputo /12/; Pavlides e Caputo /13/; Guerrieri e Vittori /14/). La dislocazione in superficie è funzione della profondità ipocentrale, dell'assetto tettonico, della reologia, della cinematica, dell'estensione dell'area di rottura e dell'entità della dislocazione all'ipocentro.

Pertanto le faglie capaci producono generalmente terremoti che raggiungono e superano la soglia del danno per scuotimento, ed inoltre, possono direttamente procurare danni alle strutture civili a seguito degli effetti che inducono sulla superficie terrestre. Infatti, per terremoti di magnitudo superiore a 6, la fagliazione superficiale presenta, in genere, rigetto almeno decimetrico e lunghezza almeno chilometrica (vedi Wells e Coppersmith /11/) e pertanto può rappresentare un pericolo significativo (anche se localizzato) che si aggiunge agli effetti indotti dallo scuotimento sismico.

Inoltre, va osservato che anche le faglie cieche attive (ossia quelle che non arrivano a dislocare la superficie topografica) possono essere rilevanti sotto il profilo della capacità di deformazione in superficie. Infatti, terremoti di forte magnitudo generati da strutture cieche possono provocare notevoli deformazioni in superficie, ad esempio in seguito alla formazione di pieghe per propagazione di faglia. In aggiunta, il movimento lungo faglie cieche sismogeniche può attivare faglie secondarie, collegate o anche non collegate con la principale (simpatetiche), capaci di dislocare la superficie topografica.

In ambiente vulcano-tettonico, infine, la fagliazione superficiale può avvenire anche in occasione di terremoti di magnitudo inferiore a 5 (vista la loro bassa profondità ipocentrale) o, addirittura, per deformazione superficiale asismica (regime di *creep)*, inducendo comunque notevoli danni alle strutture civili, come avviene lungo il versante orientale dell'Etna (Azzaro et al. /15/).

3. Eventi storici di fagliazione superficiale cosismica in Italia

In occasione di molti forti terremoti storici italiani si è verificata fagliazione superficiale. In Figura 1 vengono riportati i terremoti storici con i relativi casi di presunta o accertata fagliazione superficiale cosismica.

Ad esempio, nel caso del terremoto del 5 giugno 1688 nel Sannio, sulla base degli studi di Nappi et al. /16/, /17/ e /18/, è stato possibile stimare una lunghezza, da una estremità all'altra, della rottura cosismica di circa 32 km (Serva et al. /19/); sulla base degli studi di Galli e Bosi /20/ è possibile stimare che durante il terremoto calabrese del 5 Febbraio 1783 la lunghezza della fagliazione in superficie sia stata di oltre 35 km; sulla base della rivisitazione di documenti storici e di rilievi geologici lungo il sistema di faglie di Bojano, nel Matese settentrionale (Guerrieri et al. /21/; Michetti et al. /22/ e /23/; Esposito et al. /24/; Porfido et al. /25/), Serva et al. /19/ hanno stimato una lunghezza di rottura di 40 km e un rigetto di 150 cm associati al terremoto del 26 Luglio 1805; sulla base degli studi di Oddone /26/ sul terremoto del 13 Gennaio 1915, Serva et al. /27/ hanno individuato evidenze di fagliazione superficiale, avvenute in occasione di tale evento, lungo almeno i due piani paralleli delle faglie di Celano-Gioia e di Parasano-Cerchio, con una lunghezza, tra le due estremità, di 23 km e rigetti fino a 90 cm, tuttora riconoscibili (Figura 2); la lunghezza della fagliazione in superficie è stata di 40 km e il massimo rigetto di 100 cm nel caso, invece, del terremoto dell'Irpinia-Basilicata del 23 Novembre 1980 (Pantosti e Valensise /28/), durante il quale si è verificata rottura in superficie anche lungo altre faglie (Biumetti et al. /29/); anche a seguito del più recente terremoto aquilano del 6 Aprile 2009 (magnitudo locale 5,9 e magnitudo momento 6,3), è stata osservata una dislocazione superficiale discontinua, ma ben individuabile per una lunghezza di almeno 2,6 km (Faglia di Paganica), e forse più lunga (da 7 km a 19 km secondo varie interpretazioni), con rigetti da pochi cm a 10-15 cm (vedi Vittori et al. /30/ per le diverse interpretazioni sulla lunghezza della fagliazione superficiale); oltre alla fagliazione superficiale, a seguito dell'evento del 2009, è stata registrata un'estesa deformazione cosismica e post-sismica del settore centrale della Valle dell'Aterno, come evidenziato dai dati SAR (Guerrieri et al. /31/ e riferimenti ivi contenuti).

Per alcuni eventi storici sono stati riconosciuti fenomeni di fagliazione superficiale, senza che sia stato possibile stimarne la lunghezza, come nel caso del 1638 in Calabria (Galli e Bosi /32/), o del 1694 in Irpinia-Basilicata e del 1930 in Irpinia (Serva et al. /19/). In particolare, si ritiene importante sottolineare la "capacità" delle faglie che generano terremoti di magnitudo intorno a 6 – 6,5 (Wells e Coppersmith /11/; Guerrieri e Vittori /14/) e che sono molto diffuse in Appennino (e.g. Galli et al. /33/). Oltre ai casi storici e ben documentati di fagliazione superficiale cosismica di cui si è detto, evidenze analoghe sono state osservate su molte strutture tettoniche attive, attraverso indagini paleosismologiche. Lungo la suddetta faglia di Paganica, ad esempio, sono stati rilevati in trincea almeno due precedenti eventi di fagliazione superficiale (Galli et al. /34/).

Inoltre, lungo le pendici orientali dell'Etna sono noti fenomeni di fagliazione superficiale che agiscono sia per *creep* e quindi asismicamente, sia in occasione di terremoti di modesta magnitudo (e bassa profondità). Il sistema di faglie Provenzana-Pernicana-Fiumefreddo, che borda in direzione circa Est-Ovest il versante Nord dell'edificio vulcanico, presenta una forte componente gravitativa e un tasso di scorrimento olocenico di 27±7 mm/anno (Azzaro et al. /15/). Tale sistema si muove anche in assenza di sismicità, producendo danni rilevanti alle infrastrutture che l'attraversano. La faglia di Fiumefreddo, per esempio, produce frequenti danneggiamenti alla sede viaria dell'autostrada Messina-Catania, costringendo a continui interventi di manutenzione (Blumetti et al. /35/). Le faglie del Sistema delle Timpe, nel settore centrale del versante orientale etneo, si muovono prevalentemente in regime sismico e presentano forte evidenza morfologica, dando luogo a scarpate alte anche 60-120 metri (faglie di Moscarello, Acireale, San Leonardello), e *slip rate* fino a 2-3 mm/anno (Monaco et al. /36/). Nel contesto etneo, gli eventi sismici sono caratterizzati da bassa profondità ipocentrale (in genere minore di 2 km) e, pertanto, le faglie raggiungono la superficie nonostante i modesti rilasci energetici. Ad esempio, il terremoto di Santa Venerina del 29 Ottobre 2002 (M 4,4) ha prodotto un

esteso campo di fratturazione in superficie, organizzato in due fasce lunghe circa 5 km e larghe circa 30 metri (Blumetti et al. /35/), con danni alla rete idrica (Figure 3 e 4). Persino il terremoto del 13 maggio 2009, di magnitudo locale di appena 3,6, con epicentro nel basso versante orientale dell'Etna, ha provocato fagliazione superficiale lungo il segmento settentrionale della faglia di San Leonardello. evento principale è stato seguito da una decina di repliche con ipocentro molto superficiale (minore di 1,5 km); la cinematica è stata di tipo transtensivo destro e i rigetti massimi misurati lungo il campo di fratturazione superficiale sono stati di circa 5 cm (Azzaro et al. /37/).

4. Il catalogo ITHACA

A seguito dei terremoti del 1976 in Friuli e del 1980 in Irpinia-Basilicata, in Italia è fortemente cresciuta l'attenzione nei riguardi della sismicità e dei processi di tettonica attiva; in particolare, attraverso il Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR, fu realizzata la prima mappa delle strutture tettoniche attive sul territorio nazionale (Ambrosetti et al. /38/). Nella seconda metà degli anni '90, per rispondere al bisogno di una specifica conoscenza riguardante il pericolo da fagliazione superficiale, specialmente ai fini di *siting* e di valutazione di rischio ambientale, presso l'allora ANPA (poi APAT e infine ISPRA) fu dato inizio al progetto ITHACA *(ITaly HAzard from CApable faults).* Il progetto è finalizzato alla costruzione di un catalogo dettagliato e di facile consultazione delle informazioni disponibili sulle faglie capaci, derivanti da pubblicazioni, verifiche sul campo e studi *ad hoc*. La prima versione del catalogo è stata completata nel 2000 (Michetti et al. /23/) ed è stata poi oggetto di varie revisioni ed aggiornamenti (Di Manna et al. /39/). Il catalogo viene oggi gestito dal Servizio Geologico d'Italia – ISPRA ed è aggiornato col pro-gredire delle conoscenze inerenti la distribuzione e le caratteristiche delle faglie capaci presenti sul territorio italiano. La versione attualmente disponibile contiene circa 1500 *record* ed è consultabile *on-line* sul Portale del Servizio Geologico d'Italia (http://sgi1.isprambiente. it/GMV2/index.html).

Dal punto di vista metodologico, le faglie catalogate nel database presentano almeno una delle seguenti evidenze di capacità:

a) rigetto cosismico storico; b) *creep* o deformazione tettonica, determinati per mezzo di misurazioni GPS o da satellite; c) evidenze paleosismiche di età tardo Pleistocene-Oiocene; d) evidenze di movimento in depositi quaternari. Inoltre le faglie vengono classificate in funzione dei depositi e/o delle morfologie coinvolte. In particolare viene posta attenzione al rigetto di: I) sedimenti e/o morfologie del tardo Pleistocene-Olocene; II) sedimenti e/o morfologie del Pleistocene superiore. Inoltre, attualmente nel catalogo sono presenti anche faglie che hanno interessato sedimenti e/o morfologie del Pleistocene medio e del Pleistocene inferiore. Per tali faglie sarebbero necessarie ulteriori indagini finalizzate a verificare la loro attività in tempi più recenti. A tal proposito, bisogna considerare anche che esistono casi in cui la mancanza, in affioramento, di sedimenti di età più recente del Pleistocene inferiore o medio rende di fatto impossibile tale verifica. Le suddette faglie sono state pertanto cautelativamente inserite nel catalogo (specificando l'età nota dell'ultimo movimento), tranne nei casi in cui è stata trovata l'evidenza di sedimenti pre-Pleistocene Superiore suturanti l'elemento tettonico. Infine, nel catalogo sono contemplate anche strutture tettoniche sepolte che sono considerate attive (e.g. Boccaletti e Martelli /40/) e che, in caso di terremoto, potrebbero indurre deformazione o rottura in superficie, direttamente o attraverso *splay* ad esse correlate.

La struttura del catalogo consente di inserire informazioni sulla località geografica, l'assetto geologico, il nome della faglia, la sua cinematica e importanza (ossia se la faglia sia principale o secondaria), la segmentazione della faglia, la sua direzione, l'inclinazione e la lunghezza, la descrizione dell'espressione geomorfologica della faglia, i dati paleosismologici, la litologia interessata dalla dislocazione, le evidenze di capacità della faglia, l'ultima attività e l'affidabilità del metodo di rilevazione dell'ultima attività, il tasso di scorrimento, gli eventi sismici associati alla faglia e la massima magnitudo associabile, l'affidabilità dello studio da cui derivano i dati e i riferimenti bibliografici. utilizzatore finale, pertanto, a seconda delle proprie finalità, può consultare il catalogo e selezionare gli elementi tettonici in funzione di specifiche caratteristiche. Ai fini di un corretto utilizzo dei dati, per quanto riguarda l'ubicazione spaziale delle faglie, bisogna sempre tenere presente la scala alla quale esse sono state cartografate su ITHACA (dato specificato nella scheda relativa ad ogni faglia).

Lungi dall'essere esaustivo, il catalogo rappresenta comunque un utile strumento di conoscenza sia della posizione che dei parametri fisici delle faglie capaci e quindi della loro pericolosità incombente sul territorio italiano, così densamente popolato e industrializzato. In particolare, il catalogo può essere di supporto alla ricerca scientifica nell'ambito dell'analisi dei processi geodinamici ed inoltre è utile per: a) analisi di pericolosità ambientale e sismica, b) comprensione dell'evoluzione recente del paesaggio, c) pianificazione territoriale e d) gestione delle emergenze sismiche. Infine il catalogo ITHACA trova applicazione negli studi di microzonazione sismica. Dal 2010, la Regione Lazio, con D.G.R. n. 545, ha previsto, nelle Linee Guida per l'utilizzo degli Indirizzi e Criteri generali per gli Studi di Microzonazione Sismica nel territorio della Regione Lazio, che i professionisti, per le faglie attive e/o capaci, facciano riferimento ai prodotti cartografico-scientifici del Progetto ITHACA. In accordo con quanto previsto negli Indirizzi e Criteri generali per la Microzonazione Sismica (Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome /41/), tra le faglie presenti su ITHACA, sarà necessario selezionare quelle di cui è stata accertata l'attività negli ultimi 40000 anni. A seguito di una collaborazione tra ISPRA e Area Difesa del Suolo e Concessioni Demaniali – Ufficio Geologico e Sismico Regionale della Regione Lazio, quest'ultima metterà a disposizione dei professionisti tali faglie capaci, selezionate dal catalogo ITHACA.

I dati sono stati recentemente aggiornati nelle regioni Lazio, Abruzzo, Calabria, Sicilia, e, per l'Italia settentrionale, nelle Alpi meridionali (Friuli e Lombardia). Nonostante la Lombardia non sia caratterizzata da alta sismicità, come ad esempio il Friuli, i risultati di recenti studi (Livio et al. /42/) suggeriscono che il rischio sismico in tale regione non sia trascurabile, particolarmente per l'elevata concentrazione di elementi esposti, in aree con elevata densità di popolazione e di infrastrutture.

5. Le faglie capaci in Pianura Padana

La Pianura Padana, sebbene non faccia parte delle regioni italiane a più alto potenziale sismico, non è esente dal pericolo di fagliazione superficiale. Essa è infatti interessata da strutture attive compressive sia appenniniche, a vergenza Nord-Est, che alpine, generalmente Sud-vergenti. Sovrascorrimenti pleistocenici, coperti dai sedimenti della pianura, sono osservabili grazie alla densa rete di linee sismiche disponibili (e.g., Pieri e Groppi /43/).

I dati di sismicità storica, seppure limitati all'ultimo millennio, testimoniano l'attività di tali strutture, raggiungendo intensità rilevanti: i terremoti storici di maggiore intensità sono quello del 778 a Treviso (intensità IX-X MCS), del 2 e 3 gennaio 1117 nel veronese (intensità IX MCS), del 25 dicembre 1222 nel basso bresciano (intensità IX MCS), del 25 febbraio 1695 (intensità X MCS) ad Asolo (TV) e del 7 giugno 1891 (intensità IX MCS) in Valle d'Illasi (VR).

Sebbene in gran parte della Pianura Padana i tassi di subsidenza siano maggiori di quelli di crescita del prisma d'accrezione appenninico (Doglioni /44/; Doglioni e Prosser /45/; Carminati e Di Donato /46/), e pertanto le strutture di crescita risultino sepolte sotto spesse coltri di sedimenti (Carminati et al. /47/; Vittori e Ventura /48/), alcune di esse riescono ad arrivare in superficie, o in prossimità della superficie, deformandola. In ITHACA sono cartografate numerose strutture tettoniche compressive, appartenenti sia al dominio appenninico che a quello alpino (Figura 5), note da studi di neotettonica presenti in letteratura, per alcune delle quali è evidente la capacità di procurare deformazione o rottura in superficie. Un esempio è la struttura di Mirandola (MO) facente parte dell'arco ferrarese, una piega generata dalla propagazione di un piano di sovrascorrimento, la cui espressione geomorfologica è rappresentata dal, seppur lieve, rilievo e dalla diversione del corso dei fiumi Secchia e Panaro (Castaldini et al. /49/; Burrato et al. /50/). Per tale anticlinale Scrocca et al. /51/ hanno ricostruito i tassi di sollevamento tettonico a partire dal Pleistocene medio: sebbene i tassi decrescano nel corso del Pleistocene, un sollevamento di circa 0.16 mm/a è ancora riconoscibile nell'intervallo che copre gli ultimi 125 ka.

Analogamente, lungo il fronte pedemontano Sudalpino sono stati individuati vari rilievi collinari costituiti da pieghe correlate a retroscorrimenti Nord-vergenti (Figura 6). Sulla base di profili sismici a riflessione, Livio et al. /42/ hanno evidenziato la presenza di una fascia di pieghe per propagazione di faglia, lunghe circa 10-20 km, che deformano la successione plio-pleistocenica padana, secondo uno stile tettonico rappresentato dalla piega posta poco a Sud del Colle di Castenedolo (BS), ritratto in Figura 6. Evidenze del controllo della morfologia e della stratigrafia da parte della tettonica, durante il Pleistocene, sono state rilevate da Baroni e Cremaschi /52/ presso la collina di Ciliverghe (BS). Inoltre, presso Monte Netto, in cima alla collina di Capriano del Colle (Figura 6), in corrispondenza della culminazione di un'anticlinale secondaria, sono state individuate faglie distensive, che hanno dislocato i sedimenti tardo-pleistocenici-olocenici e raggiunto la superficie (Livio et al. /53/).

Poiché, come detto, generalmente i tassi di sedimentazione pleistocenici in Pianura Padana superano anche di un ordine di grandezza i tassi di crescita delle strutture tettoniche (vedi anche Livio et al. /42/ e Livio et al. /53/), queste ultime risultano mascherate e con blande o nulle espressioni geomorfologiche. Ma la mancanza di testimonianze in superficie non deve indurre a sottovalutare la pericolosità di deformazione e fagliazione cosismica di tali strutture e le condizioni di rischio derivanti, soprattutto a causa della diffusa presenza di elementi esposti. Infatti, dei 1101 stabilimenti a rischio di incidente rilevante presenti in tutta Italia (dati aggiornati al 1 aprile 2011; MATTM /54/), quelli ubicati in Pianura Padana superano abbondantemente le 500 unità (283 sono in Lombardia, 103 in Veneto, 99 in Emilia Romagna e 97 in Piemonte;). Inoltre, va considerata anche la diffusa rete di oleodotti e gasdotti. Pertanto, anche se non costituisce il pericolo principale (le alluvioni rimangono la maggiore fonte di *natural hazard* in Pianura Padana), la fagliazione superficiale deve essere debitamente considerata, come si fa, ad esempio, nel caso degli studi di *siting* delle centrali nucleari. Analogamente, per quanto riguarda le aree urbanizzate, la possibilità che una faglia capace intersechi una struttura civile risulta elevata. Se consideriamo, ad esempio, le aree urbanizzate della Regione Lombardia (dati CORINE Land Cover 2006), nell'intorno di 200 metri di quasi tutte le faglie capaci e le strutture tettoniche pleistoceniche (Figura 7a) sono presenti costruzioni civili (Figure 7b). La scelta di 200 metri come intorno significativo serve a tener conto delle incertezze nella esatta localizzazione della rottura superficiale; quest'ultima poi non coincide mai con una singola traccia, bensì è distribuita in una zona di ampiezza variabile. Sono in corso ricerche finalizzate proprio a definire la distanza dalle faglie capaci entro la quale si concentra il pericolo di rottura in superficie (Boncio et al. /55/).

Inoltre, la Figura 7c mostra che le faglie attualmente catalogate in ITHACA e le aree urbanizzate (al 2006) presentano molti punti di intersezione. Si precisa, comunque, che per molte di tali faglie non sono stati ancora condotti specifici studi, necessari per confermarne la capacità di rompere o deformare la superficie topografica. Analisi mirate sono auspicabili per ciascuna di tali faglie.

Guerrieri et al. /56/, definendo degli indicatori che esprimono quantitativamente il livello di esposizione a fagliazione superficiale di aree urbanizzate, hanno individuato i settori dove l'interazione tra faglie capaci e urbanizzato raggiunge livelli di criticità sul territorio italiano. In Pianura Padana, il livello di esposizione a fagliazione superficiale, pur non raggiungendo i valori critici della Sicilia orientale o della Calabria tirrenica, risulta non trascurabile. Infatti, i dati di sismicità storica (es. terremoto del 1117) e le relazioni empiriche proposte da Wells e Coppersmith /11/ e Pavlides e Caputo /13/, suggeriscono che, localmente, i rigetti cosismici in superficie potrebbero raggiungere valori massimi decimetrici. Inoltre, il grado di antropizzazione del territorio è molto elevato. Pertanto, l'interazione tra fagliazione in superficie e urbanizzato raggiunge valori medio-alti (Guerrieri et al. /56/). Oltretutto, le aree antropizzate della Lombardia (che oggi ricoprono il 14,1% dell'intero territorio regionale) sono aumentate dal 1998/99 al 2007 di 34165 ettari, cioè dell'11,3% (Regione Lombardia /57/). L'aumento delle superfici antropizzate è dovuto principalmente alle espansioni delle 'Aree commerciali'; "a servizi" e "cantieri per le grandi infrastrutture". Anche lo sviluppo delle aree residenziali è particolarmente

evidente nei centri minori e nelle aree di *hinterland* (Regione Lombardia /57/).

Pertanto, a causa della continua espansione urbana e infrastrutturale, il rischio da faglie capaci sembra destinato a crescere. Perciò, è sempre più urgente introdurre specifiche norme nelle procedure di pianificazione, *siting* e progettazione per invertire questa tendenza.

6. Conclusioni

Tra le faglie attive, le faglie capaci sono quelle più rilevanti per la società, a causa dei danni che possono procurare, non solo per effetto dello scuotimento sismico (infatti esse, nella maggior parte dei casi, sono associate ai terremoti di magnitudo elevata), ma anche direttamente per deformazione e/o dislocazione dei terreni di fondazione. Pertanto, è auspicabile la diffusione anche in Italia dell'uso del termine faglia capace, seguendo la definizione introdotta ad esempio dalla IAEA /10/, per migliorare l'efficacia e l'esattezza della comunicazione nel campo della pericolosità sismica.

Il territorio italiano, come documentato dal progetto ITHACA *(ITaly HAzard from CApable faults)* sopra illustrato, è infatti caratterizzato da numerose faglie definibili come *capaci*. Nel contesto sismo-tettonico dell'Italia, la riattivazione di tali faglie è generalmente in grado di produrre deformazione e/o rottura in superficie in occasione di terremoti di magnitudo uguale o superiore a 6 e, in ambiente vulcano-tettonico, anche per magnitudo molto inferiori o addirittura asismicamente, come avviene lungo il versante orientale dell'Etna. Anche la Pianura Padana risulta interessata da faglie capaci, comprendendo tra queste anche strutture compressive che, pur sepolte sotto una coltre talora spessa di depositi recenti, possono trasferire deformazioni e dislocazioni fino alla superficie per eventi di magnitudo medio-elevata. In generale, le suddette strutture presentano modesti tassi di scorrimento, ma, a causa della loro potenziale interazione con un tessuto urbano e industriale molto sviluppato, concorrono ad aumentare significativamente, in loro corrispondenza, il rischio già associabile allo scuotimento sismico.

Per evitare che a causa della continua espansione antropica il rischio aumenti ancora in futuro, è auspicabile che la pericolosità associata alle faglie capaci trovi il dovuto riscontro nelle norme di costruzione e nella pianificazione territoriale, come già avviene in diversi paesi, per esempio USA e Giappone, per citare i più avanzati, dove vengono imposte fasce di rispetto a seguito di studi di dettaglio. Parallelamente, la necessaria precisa identificazione delle zone soggette al pericolo di fagliazione superficiale deve essere seguita da azioni volte a ridurre il rischio soprattutto in corrispondenza di eventuali impianti ad alto rischio di incidente rilevante e oleodotti/gasdotti già presenti.