

UPLanD

Journal of Urban Planning, Landscape & environmental Design



Research & experimentation
Ricerca e sperimentazione

SEISMIC MICROZONATION: AN ESSENTIAL TOOL FOR URBAN PLANNING IN SEISMIC AREAS

Stefano Aversa^a, Teresa Crespellani^b

^a Department of Engineering, Università di Napoli Parthenope, IT

^b Department of Civil and Environmental Engineering, Università di Firenze, IT

HIGHLIGHTS

- Seismic Microzonation as a tool for urban planning
- Role of Geotechnical Engineering in Seismic Microzonation

ABSTRACT

Dramatic images of heaps of rubble produced in Italy by destructive earthquakes show the extreme vulnerability of urban systems and territory and the need for urgent measures to protect citizens, buildings, artistic heritage and landscape.

According to this study, the reduction of vulnerability must go through ordinary city planning tools, prepared in time of seismic silence. They must be a strong reference point also for reconstruction.

Therefore, a correct planning in seismic areas must be based on a deep knowledge of the territory, of its physical, historical and cultural characters.

In this context, the studies of seismic microzonation have a central role in providing information about amplification phenomena linked to the interactions between seismic waves and soils and they are indispensable to manage an extraordinary event with ordinary urban planning instruments, as might be wished in an advanced nation.

ARTICLE HISTORY

Received: November 03, 2016
Reviewed: November 07, 2016
Accepted: November 14, 2016
On line: December 22, 2016

KEYWORDS

Seismic Microzonation
Seismic Risk
Seismic Hazard
Vulnerability
Soil Dynamics

1. EARTHQUAKES IN ITALY: A NEARLY “ORDINARY” EVENT

The high number of victims and the images which media show every four or five years after a destructive earthquake are extremely telling on seismic vulnerability of the Italian urban systems located in high and medium seismic risk areas: masonry buildings which are totally crumbled, ancient churches which are in ruins together with their frescos, paintings and precious furnishings, imploded and crumbled towers and belfries, factories which have turned into heaps of rubbles, more recent reinforced concrete buildings reduced to piles of concrete slabs, strongly damaged bridges, interrupted roads, landslides, broken hydraulic pipelines, and so on.

These images show that there is still much to be done to protect a housing stock handed down for centuries and located in a territory appearing more and more fragile. In order to have an idea of the future Italy may expect, it is useful to reflect about data (De Marco et al., 2011) deriving from the list of Italian earthquakes of the last 1.000 years, according to which in Italy a destructive earthquake occurs every four-five years, in other words about 20 very serious earthquakes each century. In the last 150 years, there have been 34 destructive earthquakes and, only in the last century, more than 120.000 victims. In the past 30 years, damages exceeded 100 billion of Euros. But what should frighten those who care a lot the priceless heritage of “Italy of villages” is that each earthquake destroys or damages 70 towns on average. Therefore, in a period of a century, about 1400 municipalities change their structure and their history. The great heritage of towns and landscapes, which is a specific wealth of our country, risks being lost forever. That’s why some effective and farsighted strategies of “prevention” should be studied and implemented now and immediately.

Experience has shown that in many cases damages are caused by geological, geotechnical and morphological conditions of the site and by the nature of foundation soils, where phenomena of filtration and/or concentration of seismic waves take place and may provoke an amplification of seismic site response and territory instability phenomena (landslides, rockfalls, soil cracks, liquefaction, settlements) which, during their movements, can lead to the collapse of the above buildings, even if planned as earthquake resistant from the structural point of view.

The localization of the most charming places of our country - that is the historic centres of the big Italian cities or the ancient little villages perched on Apennine hills or even single monuments (churches, towers, and castles, etc.) around the countryside - shows that they are often situated near faults, cliff edges or seismically adverse soils such as steep slopes, ridges or recent deposits seismic where response amplification or instability phenomena are to be expected. For this reason, they are destined to be sooner or later strongly damaged, since, in many parts of Italy, especially in central Italy, destructive earthquakes are almost an “ordinary event”, because of their recurrent regularity.

Only a policy focused on vulnerability of our territory and its historical buildings in “peacetime”, that is in periods far from these events, and on all the territory with medium or high seismic risk could combine, in ordinary urban instruments, the best of scientific knowledge and techniques with the need for the historical, architectural and artistic safeguard of our urban heritage. Vice versa, as De Marco (2014) notes, legislation affecting the post-earthquake management is always “exceptional” and “occasional”. Ordinary urban instruments are instead immediately set aside and excluded after an earthquake, while they should be the steady point of reference also for reconstruction (since - at least in theory - they include all the provisions aimed at protecting the physical and cultural identity of territory). In this way, rather than to plan some rapid modifications to face new needs, a derogation from current regulations is preferred and this leads to formulate new laws, ordinances and circulars about reconstruction, in most cases hurriedly and without planning interventions for the safeguard of the identity of places, their context, landscape values, the conservation of traditional productive

activities, thus nullifying centuries of history, upsetting cultures and traditions and changing the destiny of a town.

Urban plans are excluded from reconstruction for many and not always transparent reasons. The only explanation for this exclusion is that ordinary urban instruments are still not adequate to the state of art in seismic matter, because they are not supported by microzonation studies (SMZ) which define local seismic hazard, identifying areas with the highest seismic amplification and showing the expected phenomena in the various areas of the reference territory. Since the effects that probable earthquakes may have locally are not known in detail, urban instruments of a great part of Italian towns have been developed regardless of these effects and so their dispositions are generally not effective for a concrete mitigation of seismic risk.

Since, as has been said, a developed country should pursue the objective to manage an extraordinary event with the ordinary urban instruments, a radical change is necessary for prevention strategies, and by law structural plans in areas with high and medium seismic risk should be supported by SMZ studies. Some pilot initiatives, promoted by some Regions of Central Italy and by the Department of Civil Protection bode well (Regione Emilia Romagna, 2007; Gruppo di Lavoro MS, 2008; Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010; Facciorusso, 2012; Crespellani, 2012 e 2014; Fioravante et al., 2013; Martelli et al., 2013a e 2013b; Madiati et al., 2014; Facciorusso et al., 2015). But clearly, this is not enough. Good practices in this matter must be extended to areas with the highest seismic risk and they must be supported by appropriate laws and resources. Similar considerations can also be applied to natural risks which are different from the seismic one, for example, Flooding Risk or Landslide Risk (Cascini, 2014) or Volcanic Risk, so as to produce complete and scientifically based instruments of territory and urban planning.

2. HAZARD AND RISK

As argued above, considerations on SMZ are in part common to other kinds of zonation referring to other risk typologies, caused by potentially damaging events (which are natural or anthropogenic), consequently, some terminological definitions, conventionally used in technical and scientific language on risk, can be useful. Obviously, stricter definitions are contained in codes and/or papers on specific themes.

Generally speaking and with reference to the occurrence of a particularly catastrophic event of an assigned intensity, **Risk** (R) can be defined as the symbolic product of three terms:

$$R = H \cdot V \cdot E \quad (1)$$

where H , V and E have the following meaning:

- **Hazard** (H), probability of occurrence of the event, within a certain area and a certain time interval;
- **Vulnerability** (V), degree of propensity for damages of a structure or an infrastructure following the event;
- **Exposition** (E), the amount of persons and/or goods (buildings, structures, infrastructures, cultural heritage, etc.) and/or activities which can be damaged by the event.

Since generally Hazard is expressed in probabilistic terms, also Risk has to be considered in probabilistic terms, as a random variable. For this reason, when connected to a natural event whose seriousness cannot be modified (as in the case of earthquakes or volcanic eruption), Risk cannot be null. Instead, it can be mitigated and reduced below a level that can be considered as acceptable, by

operating on the other terms of the relation (1), namely V and E . In case of landslides, floodings or anthropogenic events, at least in some cases, an intervention is also possible on the term H .

As regards seismic risk, conventionally, in seismic legislations on a world-wide scale, the representative parameter of seismic hazard is the value of the maximum acceleration at the ground surface a_{max} , generally divided by the gravity acceleration, g .

Therefore the term *seismic hazard* indicates the probability that in a certain area and in a given time interval an earthquake occurs that causes at the ground surface horizontal acceleration exceeding a fixed threshold. In other words, *seismic hazard* means the value of maximum acceleration (expressed in g) that can be exceeded in a given territory with a predetermined probability of excess (generally 10%) in a predetermined time interval (generally 50 years, corresponding to a return period of 475 years).

Since seismic activity is a physical characteristic of the reference territory, the seismic hazard can be defined on different scales: national, regional, local. According to the scale, there may be various criteria of evaluation of hazard, with reference to an *ideal site* characterized by a plane and horizontal topographic surface and stiff ground (class A of the Italian Building Code, NTC 2008), or to the conditions of a *real site*.

In the specific seismic language of NTC (2008), *seismic hazard* indicates hazard defined on a national scale, evaluated in conditions of *ideal site*. Seismic hazard is evaluated through studies of

seismic zonation extended on the whole Italian territory. These studies include surveys on historical seismic activity, seismology, geophysics, structural geology.

Figure 1 is the Map of the Italian territory in which different colors indicate the areas characterized by maximum accelerations expected on stiff and horizontal ground with a 475-year return period or (that is the same) a 10% exceeding probability in a period of 50 years.

In NTC 2008 seismic hazard on a national scale is also called "*basic seismic hazard*".

On a regional scale, the assessment of hazard is carried out in similar conditions of *ideal site*. But it should be noted that when regional zonation studies show that regional seismic activity is higher than on national scale, "*basic seismic hazard*" to be assumed in the assessment of seismic action on constructions should be, as a precautionary measure, the regional one, even when there are no specific legislative restrictions.

Local seismic hazard is assessed on a local scale (urban area or construction site), in conditions of *real site*, namely by including modifications of seismic action caused by geological, morphological and geotechnical conditions.

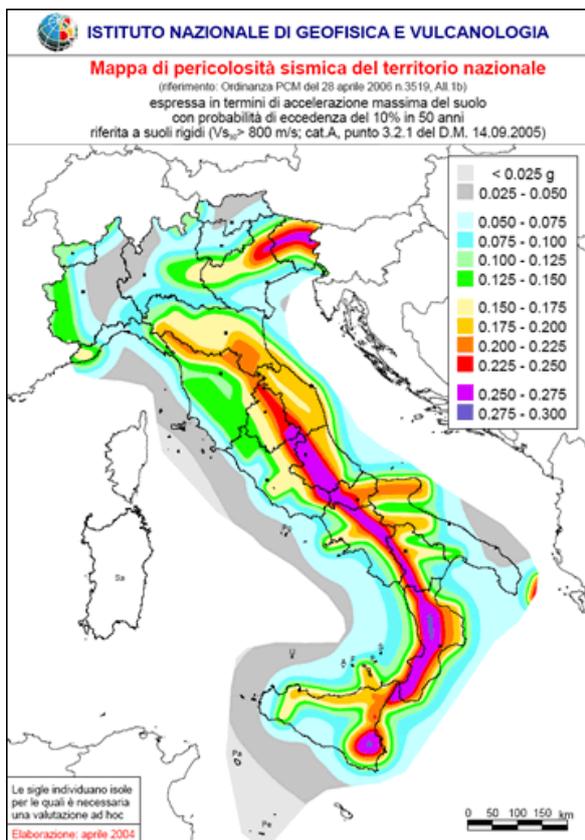


Figure 1: Map of seismic hazard of the Italian territory

On urban scale (a town or a hamlet of it) the instrument defining local seismic hazard is seismic microzonation (SMZ). Conventionally SMZ studies are aimed at urban planning and at identifying two fundamental kinds of areas, in the reference territory: *critical areas*, where instability phenomena may occur (landslides, liquefaction, subsidence, etc.) and *area where the seismic local response (SLR) can be different*.

On building scale, for the evaluation of the earthquake action, NTC 2008 define hazard on an ideal stiff and horizontal ground in a large number of points of a grid (10 km distant with each other) that cover the entire national territory and hazard (which is measured in g in terms of maximum ground acceleration) is defined in every node for different return periods. For new buildings, NTC 2008 require to assess the seismic response in the site where the building is located. In the absence of specific studies of seismic local response, seismic action to be considered in antiseismic design can be evaluated starting from basic hazard (national or regional) through a factor $S = S_S \times S_T$ where S_S is the coefficient of stratigraphic amplification and S_T is the coefficient of topographic amplification, respectively defined through the category of ground and topography. Although in a simplified manner these coefficients take into account amplifications connected to local conditions of the site.

As regards the importance of the assessment of seismic local response in the evaluation of earthquake hazard for urban planning on town scale, it will be the subject of the following paragraph in the context of SMZ.

It should be noted that, as SMZ are very complex studies, which can be carried out only with the intervention of public (regional and municipal) administrations as well as of experts in various disciplines (seismological, geological and geotechnical), their diffusion in the national territory is still limited, also for the lack of a class of specialists (engineers, geologists, personnel of local administrations) who are adequately experienced in this field.

Seismic site response studies on building scale, namely for the planning of individual works or for the verification of specific situations, affect instead much more limited areas and involve other responsibilities. They should be based on a greater density of geotechnical investigation and above all on dynamic quality tests, whereas on SMZ scale it is necessary to refer especially to knowledge already existing in the area, with a limited number of new investigation data which should provide – in addition to precise verifications - the fundamental mechanical parameters for SLR assessment through specific dynamic tests.

Differences between SLR studies for Seismic Microzonation (SMZ) and SLR studies for antiseismic design were highlighted by Crespellani and Martelli (2008) and, more recently recalled by Silvestri and d'Onofrio (2015).

3. THE NATURE OF THE PROBLEM

Although the term SMZ entered into the earthquake vocabulary more than 50 years ago, the scientific and technological essence of SMZ is not very known yet. Therefore it is important to summarize their fundamental elements starting from a short description of the nature of the problem.

Historically, systematical studies on microzonation have their origin in the observation – which is reconfirmed after each strong earthquake - that, as shown in Figure 2, during an earthquake buildings having a similar structure and located at a close distance may have very different destinies. The scientific community discussed the reasons for this different reaction under the same earthquake and structural characteristics and, after years of observations and experiments, the reasons were identified in the different mechanical features of foundation ground and of the morphological, geological and geotechnical characteristics of the site.

In order to understand the nature of the problem, it can be useful to observe Figure 3, showing that some building having identical features may be damaged in different ways because of soil nature. As the seismograms below show, seismic waves produced by an earthquake have different arrival times and amplitude because they interact with the soils they pass through, causing different kinds of damages in buildings.



Figure 2: Different seismic behavior of buildings having similar features (*Taiwan earthquake, 1999, <https://www.youtube.com/watch?v=8cqQJcmLWQ>*)

As can be seen in the figure, buildings may have different damages depending on soil characteristics. In a schematic and simplified way, maybe even a little simplistic but effective, the figure shows that the building constructed on rock doesn't have damages, the building on a poorly consolidated but "stable" soil has limited damages, the building on a loose ground has a very serious damage and finally the building on a loose sandy water-saturated soil overturns because of soil liquefaction.

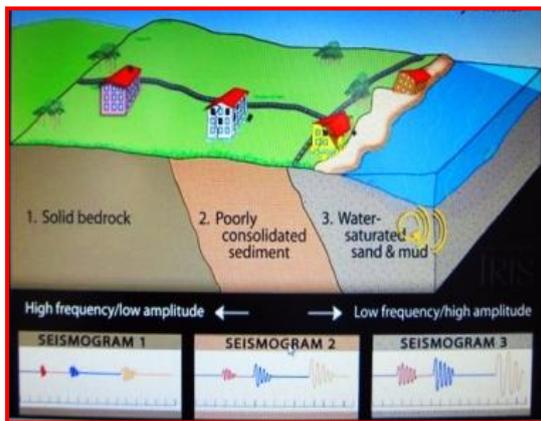


Figure 3: Different seismic behaviour of similar buildings on different subsoils (*IRIS, https://www.youtube.com/watch?v=536xSZ_XkSs*)

There are also more innocent and domestic (and sometimes even somewhat poetic!) showing however that soils are extremely sensitive to seismic waves (Figure 5). But in addition to the impressive effects, other less striking effects have been widely documented which are capable of influencing buildings behaviour in a decisive way, and they are the "local amplification effects". In fact, buildings founded on soft soils may receive considerably more amplified seismic actions if compared with similar structures built on rock or on flat stiff soil.

This example indicates that damages can depend on two main kinds of physical phenomena:

- Seismic amplification which *does not* implicate soil instability ("*site effects*");
- Seismic amplification which implicates soil instability ("*liquefaction*", "*densification*").

This case shows one of the many critical scenarios. But many other hazard scenarios connected to site conditions can be depicted. Figure 4 illustrates some typical scenarios of soil ruptures, landslides, ground settlements due to cavities and to densification of loose soils, etc.

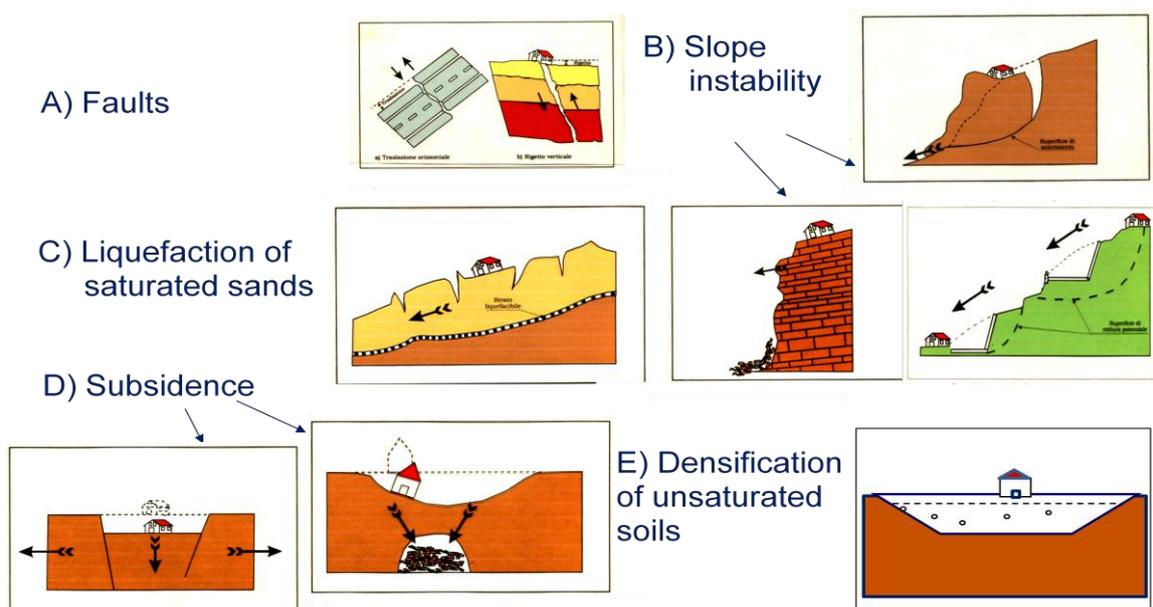


Figure 4: Scenarios of instability due to interactions of seismic waves and soils (Crespellani, 1999)

According to Figure 6, showing accelerometer measurements recorded at different depths, in the passage from bedrock to the surface of deposits the interactions between seismic waves and soils generate resonance phenomena, effects of dissipation, increase and accumulation of pore water pressure, decay of soil stiffness and resistance (*stratigraphic effects, 1D*), which are more relevant the higher is the thickness of deposit. In practice this behaviour is closely connected to soil stiffness which generally is expressed by the parameter V_s , indicating the velocity of seismic shear waves.



Figure 5: Sinking of a car and chairs for loss of bearing capacity and sand boils produced by soil liquefaction

On the edges of deposits these phenomena are accompanied by other effects linked with seismic waves reflection and refraction as well as with the generation and propagation of surface waves at the interface between differently stiff materials (*edge effects 2-3D*), and today it is well-known that beside crests and slopes there may be a focusing of seismic wave energy, connected with morphology, which leads to an amplification of seismic action in particular areas (*topographic effects*) (Figure 7).

Even if it is too early to prove this statement, something like that may have occurred at Amatrice during the recent earthquake involving the most eastern part of the Province of Rieti, on the border with Abruzzo and Marche.

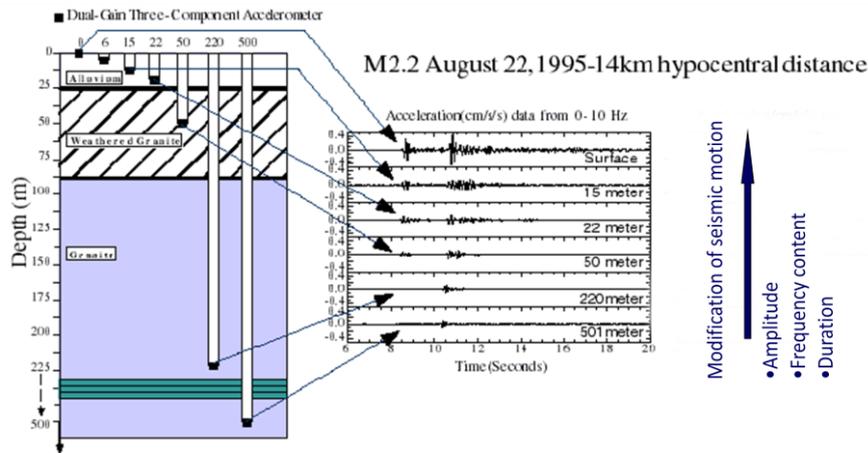


Figure 6: Stratigraphic effects observed with Garner Valley Downhole Seismographic Array

In fact, the almost total destruction of the historical town, built on a rocky hill, is certainly attributed to the vulnerability of local buildings but it could also be ascribed to a seismic amplification for topographic effects, just during the main period of oscillation of collapsed buildings. This perhaps explains why similarly vulnerable constructions (at least apparently) near the historic center of Amatrice had minor damages.

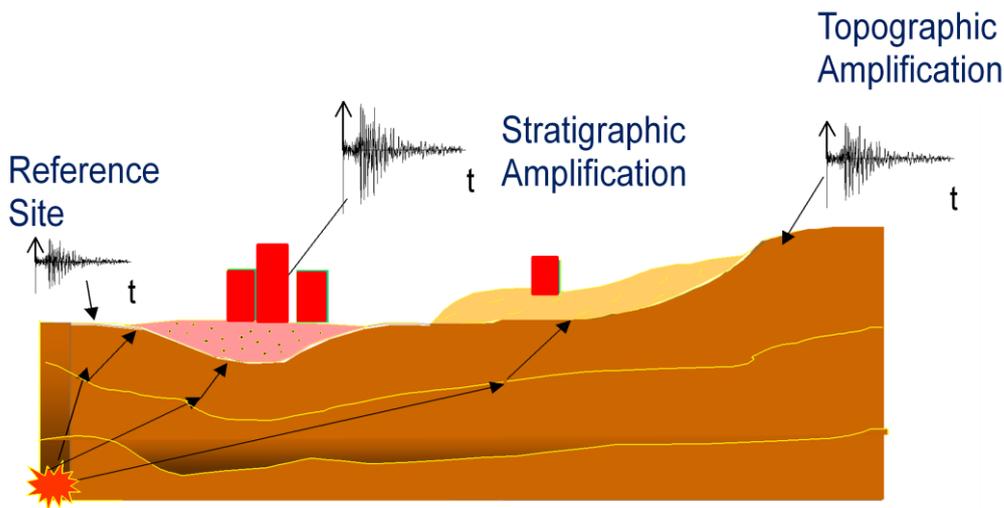


Figure 7: Modifications of an earthquake when it passes through surface deposits and rock masses in comparison with an earthquake on stiff ground with horizontal topographic surfaces ("Site effects") (Crespellani, 2009)

4. PURPOSES OF SMZ STUDIES

According to its classic definition, the term microzonation indicates *"the technical and scientific procedure of subdivision of a given territory into homogeneous areas from the point of view of the response to a reference earthquake arriving on the site, which is evaluated by taking into account the interactions between seismic waves and geological, topographic and geotechnical local conditions"*

(“seismic local hazard) modifying “basic hazard” (that is the hazard evaluated on reference stiff and flat ground)”. As already observed in paragraph 2, in the seismic language seismic hazard means the maximum intensity of an earthquake expected in a predetermined time interval and expressed in terms of maximum acceleration or other synthetic parameters which can be significant for urban planning.

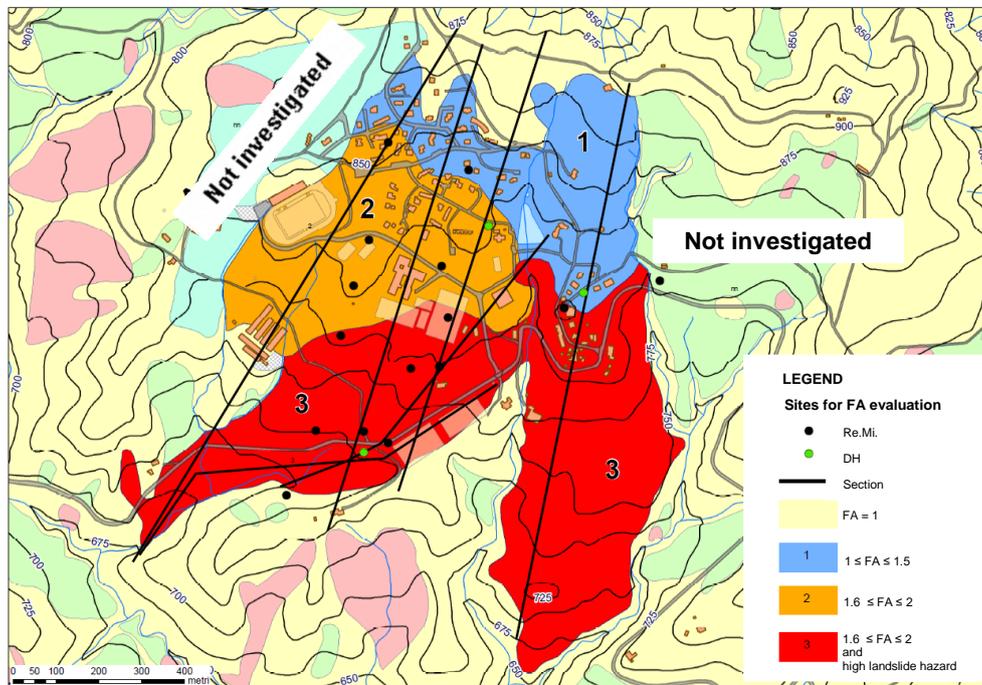


Figure 8: SMZ map of level 3 at Spinello (Facciorusso et al., 2012)

This definition explains the importance of this preventive tool for urban planning and in embryo contains the main scientific problems an SMZ study must deal with.

The assumptions of SMZ are basically two:

- 1) each site has a different response to the earthquake arriving on a given territory;
- 2) the same site has a different response depending on the energy of the earthquake.

This means that the first problem of an SMZ study is to fix a *reference earthquake*, namely an earthquake with a predetermined return period. Generally speaking, this earthquake is conventionally defined as the earthquake having a 475-year return period, but it could also be different. That is why it must be specified.

The second problem is how to assess the different responses of soils in a given territory. If, theoretically, we had a very large number of accelerometer stations on the surface of this territory we could observe that, during an earthquake with an energy equal to that of the reference earthquake, because of different geological, morphological and geotechnical conditions (local conditions) the values of the acceleration peak in the various sites would be in general different from the values observed in a reference flat stiff ground.

But it could also be argued that in some areas these values do not differ much and so it is possible to identify some homogeneous areas within the territory. But actually there aren't any dense networks of accelerometers nor data recorded during an earthquake as in the reference earthquake, therefore these areas are identified through scientific and theoretical studies by means of “models” defined by investigations and analyses of different complexity and diffusion, including articulated and complex assessments and elaborations.

A third problem is the choice of the “synthetic parameters” for defining the amplification to be able to associate each homogeneous area with a “number” indicating its level of hazard. This is not an easy question and so, in seismic literature, the discussion is still ongoing. Horizontal maximum acceleration is often mentioned. In other cases, maybe more conveniently, for the purpose of urban planning typical of these studies, building typology of the area is taken into account, although in a simplified way, through other parameters such as the Housner Intensity (Gruppo di Lavoro MS, 2008).

Finally, a fourth problem is defining the perimeter of the homogeneous areas and the drafting of the SMZ final map (generally on a scale 1:10.000), which, apart from being scientifically rigorous, should be also “readable” by non-experts (personnel of local administrations, citizens, etc.). Figure 8 shows an example of SMZ map. It should be noted that the definition of perimeter must be generally carried out on geological and geotechnical basis, that is by identifying geological formations starting from Geological observations and stratigraphic surveys. The SMZ map is also associated with other detail maps containing further interesting parameters (values of the safety margin against liquefaction, fundamental periods of the ground, etc.).

The flux diagram in Figure 9 illustrates the operations required for a study of Seismic Microzonation. The above-mentioned phase of national (or regional) seismic zonation is shown on the top left, whereas local activities are listed on the top right.

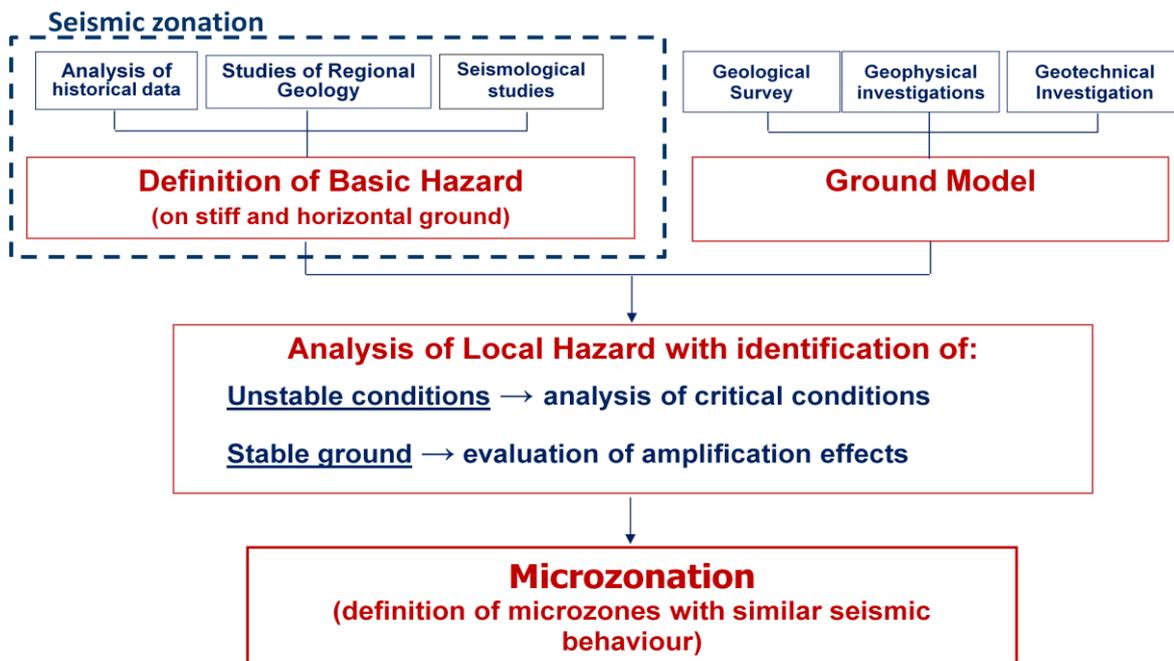


Figure 9: Flux diagram for a study of seismic Microzonation

An SMZ study includes more steps and the most important concerning territory are the assessment of local seismic amplification and the drafting of SMZ map. The first one requires the determination of the seismic motion (or better of the seismic motions) and the construction of a ground model. The drafting of the SMZ map needs two basic evaluations for stable and potentially unstable areas. The first operation requires a lot of studies and investigations. As regards seismic motion nowadays the question is easier because of the new classification of the national territory.

The ground model needs a crossed knowledge of many disciplines. The second step also requires complex evaluations and interpretations often associated with uncertainties.

Today the technical modalities of carrying out SMZ studies and drafting SMZ maps are defined by Manual TC4 (ISSMGE, 1999) on international scale, by Gruppo di Lavoro MS (2008) and by AGI (2005) guidelines at national level, by individual Regions addresses for seismic microzonation studies issued on regional scale. In Emilia-Romagna, the guidelines for the studies of seismic microzonation aimed at territory and urban planning were issued in 2007 (Regione Emilia-Romagna, 2007).

5. LEVELS OF INVESTIGATION OF SMZ STUDIES

Because of the complexity of an SMZ study, the cost of investigations and different targets, there are three levels of investigation corresponding to different methods of assessment of local hazard:

- level 1 (L1): this is the basic level, often considered as preparatory to the real SMZ studies; it is based on the collection of pre-existent data, processed to subdivide territory in microzones that are qualitatively homogeneous from a seismic point of view; amplification effects are evaluated on geological basis;
- level 2 (L2): it associates some quantitative parameters of engineering interest to the homogeneous zones, by means of additional and targeted surveys; it is carried out through “simplified abacuses”, defining the amplification factors of the elastic spectra on the surface, associated with the individual lithostratigraphy;
- level 3 (L3): it gives a *seismic microzonation map with specific* information about particular subjects or areas; a quantitative assessment of effects requires special procedures (which are different for the various kinds of problems SSR, liquefaction, etc.) using complex calculation programs requiring high-quality input data.

Table 1: Levels of Seismic Microzonation according to ISSMGE (1999)

	Level 1	Level 2	Level 3
Ground motions	<ul style="list-style-type: none"> • Historical earthquakes and existing information • Geological maps • interviews with local residents 	<ul style="list-style-type: none"> • Microtremor • Simplified geotechnical study 	<ul style="list-style-type: none"> • Geotechnical investigation • Ground response analysis
Slope instability	<ul style="list-style-type: none"> • Historical earthquakes and existing information • Geological and Geomorphological maps 	<ul style="list-style-type: none"> • Air photo and remote sensing • Field studies • Vegetation and precipitation data 	<ul style="list-style-type: none"> • Geotechnical investigation • Analyses
Liquefaction	<ul style="list-style-type: none"> • Historical earthquakes and existing information • Geological and Geomorphological maps 	<ul style="list-style-type: none"> • Air photo and remote sensing • Field studies • Interview with local residents 	<ul style="list-style-type: none"> • Geotechnical investigation • Analyses
Scale of mapping	1: 1.000.000 - 1:50.000	1:100.000 - 1:10.000	1:25.000 - 1:5.000

Table 1 gives more detail about the specific nature of the different levels of Seismic Microzonation, as set by TC4 of ISSMGE (1999). In particular, it is noted that from Level 1 to Level 3 there is a need for greater resources in terms of costs, investigations, calculation means, and higher professional qualifications. But the products of the three levels are qualitatively very different. Finally, as the level rises, the study multidisciplinary increases because the first one is only based on geological information, whereas level 3 also requires knowledge and tools typical of geotechnical engineering. One of the still debated questions is the choice of engineering parameters to express amplification effects in the stable areas. Level 2 in Gruppo di Lavoro MS (2008) contains an amplification coefficient which can be calculated by abacuses in the text according to shear waves velocity V_S and to thickness H of deposit. This simplifies the work of experts involved in an SMZ study and of control authorities. Nevertheless, many doubts are raised about the Level 2 procedure in the scientific community, so that many researchers prefer to take into account only Level 1, exclusively based on geological observations and markedly more qualitative, and Level 3, which uses more quantitative approaches typical of Soil Dynamics.

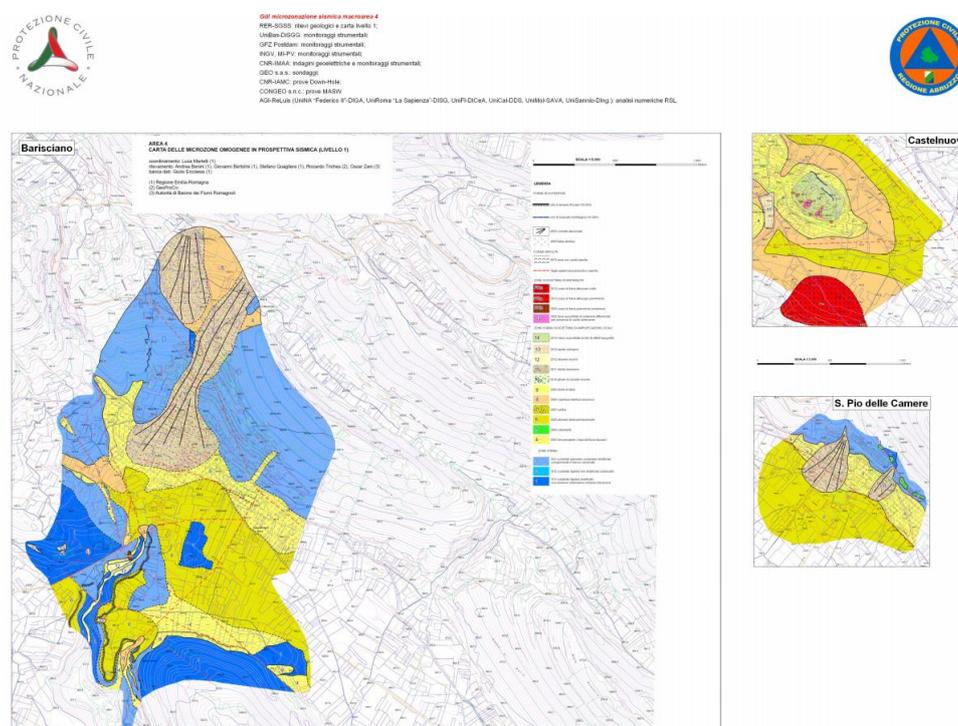


Figure 10: Seismic Microzonation map of Barisciano of Level 1 (*Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010*)

Figures 10 and 11 show two SMZ maps of the same municipality, one of Level 1 and the other of Level 3, both drawn after the earthquake of L'Aquila. The Level 1 Map is based on only geological studies, whereas the Level 3 one has been drawn by a team of experts from different disciplines.

Although without going into details, it is clear that some parts of the territory, considered as seismically homogeneous in low-level SMZ, have been differentiated in high-level SMZ.

6. PREVENTION AND SMZ

In conclusion, an SMZ study is basically a technical and scientific operation, requiring complex and multidisciplinary studies. But it also has a social dimension, because the knowledge of the various sites response to the reference earthquake is an essential condition to take a decision about territory management.

By giving elements on the fundamental vibration period of the ground in the new residential areas, an SMZ map allows to define heights and volumes able to avoid phenomena of double resonance; by indicating the most critical scenarios it enables to locate green areas in the most dangerous zones; by detecting hazard hierarchies it helps to choose the safest zones for the strategic buildings, to set intervention priorities in the existing inhabited areas; it allows to identify the critical points of infrastructures and lifelines. But an SMZ map makes it easier to plan emergency, for example, to choose muster stations, to settle temporary facilities, to organize emergency road networks.

Finally, an SMZ map is a fundamental tool for reconstruction. An earthquake is also a chance to check the effectiveness of SMZ studies, but making adjustments on already existing SMZ maps is much easier than starting from zero. A reconstruction able to ensure a greater safety than in the past must start with an updated knowledge of response in different zones and from a new territory planning based on this knowledge. Ultimately, it is a tool of basic knowledge in:

- *urban and territory planning*
- *emergency planning and management*
- *post-earthquake reconstruction*

and it is also a basic tool for the preparatory studies for seismic design, as well as for specific evaluations of seismic risk in a wider area than the single building area, but which could involve it for example in the case of a landslide provoked by the earthquake. As already said, SMZ never can replace SSR studies for structural and geotechnical design.

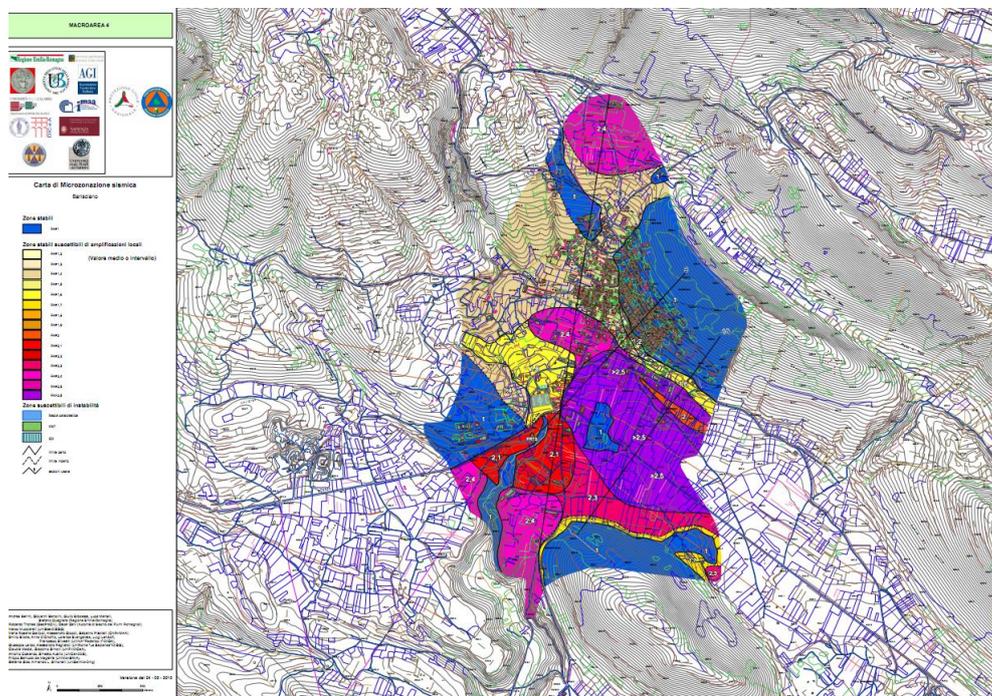


Figura 11: Seismic Microzonation map of Barisciano of Level 3 (*Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010*)

SMZ is, therefore, a prevention tool, a word that, as is well-known, includes structural and non-structural positive actions making housing stock and territory safer in the case of an earthquake.

7. A CONCRETE PROPOSAL

Recent earthquakes, including that which affected Rieti territory on August 24th, 2016, and those of Valnerina of October 26th and 30th, 2016 increasingly confirm that Italy has a serious deficiency in seismic prevention. In default of targeted policies and of an adequate allocation of funds within a reasonable time, historic Italy, as well as more recent one, risks “crumbling”, the historical part because too old and not structurally consolidated, the most recent part because it is preceding anti-seismic laws, or because its structures have been constructed without respecting good building practices, or because located in areas with high local hazard, which was not known when they were built, or even because they are unauthorized. If an earthquake occurs in Calabrian Arc, like the Messina earthquake in 1908, Reggio Calabria and Messina would be strongly destroyed with a serious loss of human life, since 90% of buildings are in these categories.

This is an absolutely realistic picture and it could be depressing. But it is noteworthy that from the technical point of view in Italy seismic knowledge is very advanced and some questions, already identified long ago in Grandori and Barberi’s Report to President of the Italian Republic, Sandro Pertini, after the earthquake in Friuli in 1976 and still valid, are quite clear.

On a national scale, the classification map of Italian territory, shown in Figure 1, is a steady reference point for preventions tools on the other scales. Similarly, if strictly respected, NTC 2008 guarantee an excellent anti-seismic prevention for new buildings.

Both on a national and on a local scale, the weakest point is geological cartography. The completion of geological cartography of national territory to the scale of 1:50.000 (project CARG which so far has covered about 50% of the Country) is extremely urgent, but, above all, in view of SMZ and urban planning, all residential areas must have a geological map to the scale of 1:10.000, because it is indispensable for reducing seismic risk of urban systems and territories to local scale.

Moreover, if all populated areas have SMZ maps, it would be a good civil progress for our Country. In this respect, it is worth recalling some good examples, such as the case of the Regione Umbria: after the earthquake in Umbria and Marche in 1997, in the first subsequent three months it promoted the drawing for thirty towns of geological maps 1:10.000, which were the basis for drawing the SMZ map of level 1. The most important towns were also involved in SMZ studies of level 3. There were similar initiatives also in the Regione Marche, although less extended because this territory was less affected by the earthquake. At Fabriano SMZ studies of level 3 were carried out (Marcellini and Tiberi, 2000). Eventually, in these two Regions, other SMZ studies were carried out in centers of special regional interest. Moreover, particularly commended are the SMZ studies promoted by Regione Emilia Romagna which for many years, in seismic silence, has taken many functional initiatives to SMZ (Martelli and Romani, 2012; Facciorusso, 2012), such as an impressive database, geological maps to 10.000 all over the Region, criteria and addresses to uniform SMZ studies aimed at urban planning, the training of professionals and experts in SMZ, the creation of a communication between municipal and regional authorities to promote SMZ studies. Studies of Seismic Microzonation (Lanzo et al., 2011; Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010) were carried out for some Municipalities of the Aterno valley after the L’Aquila earthquake.

It is however recommended that Seismic Microzonation studies in the various towns are carried out with a multidisciplinary approach and according to Gruppo di Lavoro MS (2008) and any further regional address, by specifically trained professionals and that their results have to be checked by

regional or national bodies, in order to obtain qualitatively similar products, or anyway reliable, on national or at least regional territory.

As to existing buildings, it is well-known that their reinforcement requires two basic measures: *seismic upgrading* (a strict application of building rules in a seismic zone to strengthen existing buildings) and *seismic improvement* (interventions such as ties, props, etc., so as to reduce the risk of collapse, although accepting a certain level of damage during the earthquake). The first measure is quite expensive and takes a considerable time. On the contrary, the second one is economically acceptable and rapidly feasible. If seismic improvement could be extended to all the existent housing stock, by reserving seismic upgrading only to strategic buildings, this would lead to a good level of protection, especially to safeguard human life.

The final step is giving all populated areas urban instruments which take into account both safety and the protection of identity and beauty.

A clear policy is necessary to make Italy a big construction site for its safety and for the protection of its historical, landscape and productive heritage, by involving national, regional and municipal authorities, universities, experts, managers, professors, and citizens. Prevention is widespread and polyphonic culture.

Since resources are always limited, some important choices have to be made following, for example, the De Marco's proposal (2016) of concentrating resources on reducing the seismic risk of Apennine towns marked in violet in the classification map in Figure 1. All these towns, where earthquake are expected to have a magnitude higher than 5.5, must have urban instruments as a central reference, prepared with correct planning criteria including conservation of identity characteristics and precautionary measures for reducing seismic risk deriving from SMZ maps and rules. In the case of destructive earthquakes, reconstruction has to be carried out according to these instruments.

MICROZONAZIONE SISMICA: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER LA PIANIFICAZIONE URBANISTICA IN AREE A RISCHIO SISMICO

1. I TERREMOTI IN ITALIA: UN EVENTO QUASI “ORDINARIO”

L'elevato numero di vittime e le immagini, che, ogni quattro o cinque anni, ci vengono presentati dai mezzi di informazione subito dopo un terremoto distruttivo, sono quanto mai eloquenti sulla vulnerabilità sismica dei sistemi urbani italiani situati nelle zone ad alta e media sismicità: costruzioni in muratura completamente sbriciolate, antiche chiese infrante insieme ai loro affreschi, dipinti e preziosi arredi, torri e campanili implosi e polverizzati, fabbriche e aziende trasformati in ammassi di macerie, edifici più recenti in cemento armato ridotti a cataste di solai latero-cementizi, ponti fortemente danneggiati, strade interrotte, frane, condutture idrauliche tranciate, e così via. Immagini che dimostrano quanto ancora ci sia da fare per salvaguardare un patrimonio abitativo tramandato da secoli e situato in un territorio che sembra sempre più fragile.

Per avere un'idea del futuro che l'Italia può attendersi, è utile riflettere sui dati (De Marco et al., 2011) rilevabili dal catalogo dei terremoti italiani degli ultimi 1.000 anni, da cui si deduce che in Italia si verifica un terremoto distruttivo ogni quattro-cinque anni, ovvero circa 20 terremoti di elevata intensità ogni secolo. Negli ultimi 150 anni si sono registrati 34 terremoti distruttivi e solo nel secolo scorso si sono avute più di 120 mila vittime. Negli ultimi 30 anni i danni hanno superato i 100 miliardi di euro. Ma l'aspetto che dovrebbe fare tremare tutti coloro che hanno a cuore l'impagabile patrimonio de "l'Italia dei paesi" è che ogni terremoto distrugge o danneggia mediamente 70 comuni. Quindi, in un secolo, circa 1400 comuni modificano la loro conformazione e la loro storia. Il grande patrimonio di centri abitati e di paesaggi, che è una specifica ricchezza del nostro paese, rischia di essere perduto per sempre. Ecco perché occorre studiare e mettere in atto, ora e subito, delle strategie di "prevenzione" efficaci e lungimiranti.

L'esperienza ha dimostrato che in molti casi il danneggiamento è imputabile alle condizioni geologiche, geotecniche e morfologiche del sito e alla natura dei terreni di fondazione, dove avvengono fenomeni di filtraggio e/o di concentrazione delle onde sismiche che possono dare luogo a fenomeni di amplificazione della risposta sismica locale e a fenomeni di instabilità del territorio (frane, crolli di roccia, rotture del terreno, fenomeni di liquefazione, cedimenti) che possono portare al collasso, trascinandole con sé nei loro spostamenti, le sovrastanti costruzioni anche se progettate come sismoresistenti dal punto di vista strutturale.

Osservando la localizzazione delle parti più affascinanti del nostro paese, cioè i centri storici di grandi città italiane o gli antichi borghi arroccati sulle colline appenniniche o anche singoli monumenti (chiese, torri e castelli, ecc.) sparsi nelle campagne, si vede che questi sono spesso situati in prossimità di faglie, bordi di ciglio, dirupi o in terreni sismicamente sfavorevoli, quali ripidi pendii, zone di cresta o depositi recenti dove sono da attendersi amplificazioni della risposta sismica o fenomeni di instabilità. Sono perciò destinati ad essere fortemente danneggiati, in tempi più o meno lunghi, perché in molte parti di Italia, specie dell'Italia Centrale, i terremoti distruttivi sono, per la ciclica regolarità con cui si ripetono, quasi un "evento ordinario".

Solo una politica, che affronti il tema della vulnerabilità del nostro territorio e del suo edificato storico in "tempo di pace", cioè in periodi lontani temporalmente dagli eventi, e su tutto il territorio soggetto a pericolosità sismica media o elevata, potrebbe coniugare, negli strumenti urbanistici ordinari, il meglio delle conoscenze scientifiche e tecniche con la necessità della salvaguardia storico-architettonica e artistica del nostro patrimonio urbano. Viceversa, se si osserva la legislazione che

riguarda la gestione post-terremoto e la ricostruzione, si può notare, come osserva De Marco (2014) che questa è sempre "eccezionale" e "d'occasione". Gli strumenti urbanistici ordinari, che dovrebbero essere il saldo punto di riferimento anche per la ricostruzione (in quanto - almeno in linea teorica - inclusivi di tutte le disposizioni finalizzate alla tutela dell'identità fisica e culturale del territorio), vengono invece immediatamente accantonati ed estromessi a seguito di un terremoto. Così che anziché predisporre in tempi rapidi delle varianti per far fronte alle nuove esigenze, si preferisce operare in regime di deroga dalle norme vigenti, formulando sbrigativamente nuove leggi, ordinanze e circolari sulla ricostruzione, per lo più senza una pianificazione degli interventi che ponga attenzione alla salvaguardia dell'identità dei luoghi, al contesto di appartenenza, ai valori del paesaggio, alla conservazione delle attività produttive tradizionali, azzerando secoli di storia, stravolgendo culture e tradizioni e cambiando il destino di un paese.

Le ragioni di questa estromissione dei piani urbanistici dalla ricostruzione sono molte e non sempre trasparenti. L'unica cosa che potrebbe giustificare il loro travalicamento è che gli strumenti urbanistici ordinari non sono ancora adeguati allo stato dell'arte in materia sismica, in quanto non supportati da studi di microzonazione (MZS) che definiscano la pericolosità sismica locale, individuando le aree soggette a maggiore amplificazione del segnale sismico e indicando i fenomeni attesi nelle varie zone del territorio di riferimento. Mancando di una conoscenza minuta degli effetti che i probabili terremoti possono produrre localmente, gli strumenti urbanistici della gran parte dei comuni italiani sono stati sviluppati prescindendo da tali effetti e quindi le disposizioni in essi contenute non sono in generale valide per una effettiva mitigazione del rischio sismico.

Poiché, come detto, l'obiettivo che un paese avanzato dovrebbe porsi è quello di poter gestire un evento straordinario con gli strumenti urbanistici ordinari, occorrerebbe un cambiamento radicale nelle strategie di prevenzione, prevedendo per legge che i piani strutturali nelle zone sismiche ad alta e media sismicità siano supportati da studi di MZS. Talune iniziative pilota, promosse da alcune Regioni dell'Italia Centrale e dal Dipartimento della Protezione Civile lasciano ben sperare (Regione Emilia Romagna, 2007; Gruppo di Lavoro MS, 2008; Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010; Facciorusso, 2012; Crespellani, 2012 e 2014; Fioravante et al., 2013; Martelli et al., 2013a e 2013b; Madiati et al., 2014; Facciorusso et al., 2015). Ma evidentemente non basta. Occorre che le buone pratiche in materia si estendano almeno alle parti del paese sismicamente più esposte e siano supportate da strumenti legislativi e risorse adeguate. Considerazioni simili a quelle che si svilupperanno nel seguito si possono anche fare con riferimento a rischi naturali diversi da quello sismico, ad esempio il Rischio Alluvioni o il Rischio Frane (Cascini, 2014) o il Rischio Vulcanico, in modo da produrre strumenti di pianificazione territoriale ed urbana completi e scientificamente basati.

2. PERICOLOSITÀ E RISCHIO

Poiché, come detto in precedenza, le considerazioni sul ruolo della MZS sono in parte comuni ad altri tipi di zonazione che fanno riferimento ad altre tipologie di rischio, dovute a eventi potenzialmente dannosi (naturali o di origine antropica), può essere utile richiamare alcune definizioni terminologiche, convenzionalmente usate nel linguaggio tecnico-scientifico sul rischio. Ovviamente definizioni più rigorose sono contenute nelle normative e/o nei trattati su temi specifici.

Da un punto di vista molto generale e con riferimento al verificarsi di un evento potenzialmente catastrofico di assegnata intensità, il **Rischio** (R) può essere definito come il prodotto simbolico di tre termini:

$$R = H \cdot V \cdot E \quad (1)$$

in cui H , V e E hanno il seguente significato:

- **Pericolosità** (H), probabilità di accadimento dell' evento, all'interno di una certa area e in un certo intervallo di tempo;
- **Vulnerabilità** (V), grado di propensione di una struttura o infrastruttura a subire danni a seguito del suo verificarsi;
- **Esposizione** (E), numero di persone e/o beni (abitazioni, strutture, infrastrutture, beni culturali, ecc.) e/o attività (economiche, sociali, culturali, ecc.) che possono subire danni dall'accadimento dell'evento.

Poiché in genere la pericolosità è espressa in termini probabilistici, anche il Rischio va considerato in termini probabilistici, come variabile aleatoria. Per questa ragione, il Rischio, connesso a un evento naturale su cui non si può intervenire per modificarne la gravità (come nel caso dei terremoti o delle eruzioni vulcaniche), non può essere mai nullo. È possibile, invece, mitigarlo per portarlo al di sotto di un livello considerato accettabile, operando sugli altri termini della relazione (1), cioè V ed E . Nel caso delle frane, alluvioni o di eventi antropici si può invece, almeno in alcuni casi, intervenire anche sul termine H .

Per quanto riguarda il rischio sismico, convenzionalmente, nelle normative sismiche a scala mondiale, il parametro rappresentativo della pericolosità sismica è il valore dell' accelerazione massima prodotta in superficie a_{max} , rapportato all'accelerazione di gravità g .

Pertanto con il termine *pericolosità sismica* si intende la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che provochi in superficie una scossa sismica che superi una prefissata soglia massima di accelerazione. In altri termini, si può dire che per pericolosità sismica si intende il valore di accelerazione massima (espressa in g) che può essere superata in un dato territorio con una prefissata probabilità di eccedenza (generalmente del 10%) in un prefissato intervallo di tempo (in genere, 50 anni, che corrisponde a un periodo di ritorno di 475 anni).

Poiché la sismicità è una caratteristica fisica del territorio di riferimento, la pericolosità sismica può essere definita a diverse scale: nazionale, regionale, locale. A seconda della scala si assumono diverse ipotesi sulle modalità di valutazione della pericolosità, facendo riferimento a un *sito ideale* caratterizzato da una superficie topografica piana e con terreni di categoria A delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), o alle condizioni di *sito reale*.

Nel linguaggio sismico specifico delle NTC 2008 quando si parla di *pericolosità sismica* si fa riferimento alla pericolosità definita a scala nazionale, valutata in condizioni di *sito ideale*. La pericolosità sismica viene valutata attraverso studi di *zonazione sismica* estesi all'intero territorio italiano. Gli studi comprendono indagini di sismicità storica, indagini sismologiche, geofisiche, di geologia strutturale. Nella Figura 1 è riportata la Carta del territorio italiano sulla quale con colori differenti sono segnate le zone caratterizzate da accelerazioni massime attese su affioramento rigido e orizzontale con periodo di ritorno di 475 anni e probabilità di eccedenza del 10%.

Nelle NTC 2008 la pericolosità sismica a scala nazionale viene anche chiamata "*pericolosità sismica di base*".

A scala regionale, la valutazione della pericolosità viene condotta in analoghe condizioni di *sito ideale*. È da tenere presente, però, che laddove vi siano studi di zonazione regionale che dimostrino che la sismicità regionale è più alta di quella valutata a scala nazionale, la "*pericolosità sismica di base*" da assumere nei calcoli dell'azione sismica sulle costruzioni dovrebbe essere, a fini cautelativi, quella regionale, anche quando non vi sono specifici vincoli legislativi.

Si definisce *pericolosità sismica locale* la pericolosità, valutata a scala locale (centro abitato o manufatto), in condizioni di *sito reale*, includendo cioè le modificazioni che l'azione sismica subisce per effetto delle condizioni geologiche, morfologiche e geotecniche del sito.

A scala di centro abitato (o di una sua frazione) lo strumento che definisce la pericolosità sismica locale è la microzonazione sismica (MZS). Convenzionalmente gli studi di MZS sono finalizzati alla pianificazione urbanistica e hanno come obiettivo l'identificazione, nel territorio di riferimento, di due

tipi fondamentali di aree: le *aree critiche*, dove possono avvenire fenomeni di instabilità (frane, liquefazione, subsidenza ecc.), e le *zone dove si può avere una diversa risposta sismica locale* (RSL).

A scala di manufatto le NTC 2008, ai fini della valutazione dell'azione sismica, definiscono la pericolosità non per zone omogenee ma in modo puntuale su un ideale affioramento rigido e orizzontale. Tutto il territorio nazionale è coperto da una griglia i cui nodi distano circa 10 km e la pericolosità (in termini di accelerazione massima al suolo misurata in g) è definita in ogni nodo per diversi periodi di ritorno dell'evento sismico.

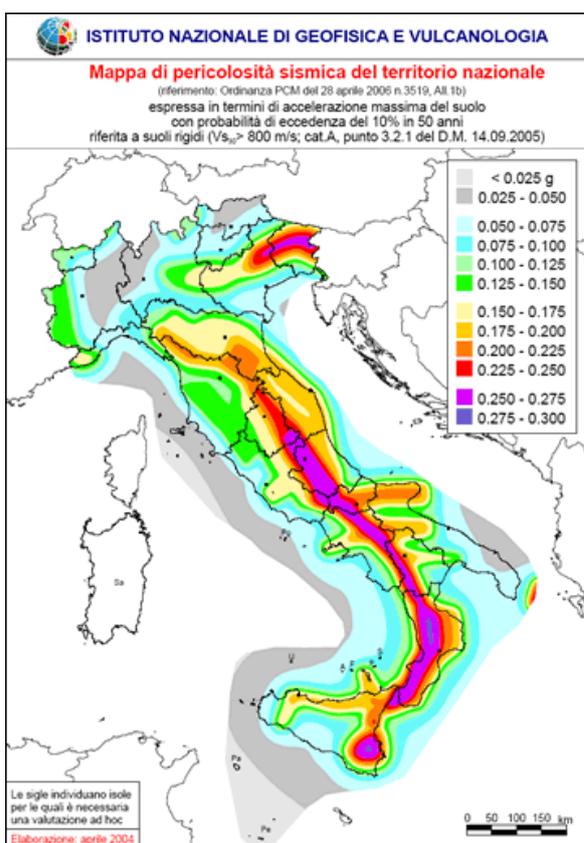


Figura 1: Mappa di pericolosità sismica del territorio italiano

discipline (sismologiche, geologiche e geotecniche), la loro diffusione sul territorio nazionale è ancora limitata, anche perché non si dispone ancora di una classe di tecnici (ingegneri, geologi, funzionari delle amministrazioni) sufficientemente preparata in tale campo.

Gli studi di risposta sismica locale a scala di manufatto, cioè per la progettazione di singole opere o per la verifica di specifiche situazioni, riguardano invece aree molto più limitate e coinvolgono altre responsabilità. Si dovrebbero basare su una maggiore densità di indagini geotecniche e soprattutto su prove dinamiche di qualità, mentre alla scala della MZS occorre riferirsi soprattutto alle conoscenze già esistenti sul territorio, contenendo il numero delle nuove indagini che devono fornire, oltre a verifiche puntuali, i parametri meccanici indispensabili per la valutazione della RSL attraverso prove mirate di tipo dinamico.

Per le nuove costruzioni le NTC 2008 prescrivono di valutare la risposta sismica locale del sito in cui si colloca la costruzione. In assenza di studi specifici di risposta sismica locale, l'azione sismica da considerare nella progettazione antisismica può essere valutata a partire dalla pericolosità di base (nazionale o regionale) attraverso un fattore $S = S_S \times S_T$ dove S_S è il coefficiente di amplificazione stratigrafica e S_T il coefficiente di amplificazione topografica, rispettivamente definiti attraverso la categoria di sottosuolo e la topografia. Seppure in maniera semplificata tali coefficienti tengono conto dei fenomeni amplificativi legati alle condizioni locali del sito.

Dell'importanza della valutazione della risposta sismica locale nella valutazione della pericolosità sismica finalizzata alla pianificazione urbanistica alla scala di centro abitato, si tratterà nel paragrafo successivo nell'ambito della MZS.

Va osservato che, poiché gli studi di MZS sono studi molto complessi, che possono essere condotti solo con l'intervento delle pubbliche amministrazioni (regionali e comunali) nonché di tecnici esperti in varie

Le differenze tra studi di RSL per la stesura di mappe di MZS e studi di RSL per la progettazione antisismica sono state messe in evidenza da Crespellani e Martelli (2008) e ricordate più recentemente da Silvestri e d'Onofrio (2015).

3. LA NATURA DEL PROBLEMA

Benché la parola MZS sia entrata nel vocabolario sismico oltre 50 anni fa, la sostanza tecnico-scientifica degli studi di MZS non è ancora molto conosciuta. Merita perciò richiamarne sinteticamente gli elementi fondamentali a partire da una breve descrizione della natura del problema.



Figura 2: Differente comportamento sismico di edifici di analoghe caratteristiche (*Terremoto di Taiwan, 1999*, <https://www.youtube.com/watch?v=8cqQJcMcLWQ>)

Storicamente, gli studi sistematici sulla MZS hanno preso avvio dalla constatazione, riconfermata praticamente da ogni terremoto forte, che, come mostra la Figura 2, edifici di uguali caratteristiche strutturali posti a distanza ravvicinata, in occasione di un evento sismico, possono avere destini molto diversi.

La comunità scientifica si è interrogata sulle ragioni di questi differenti comportamenti a parità di scossa sismica e di caratteristiche strutturali e, dopo anni di osservazioni ed esperimenti, le ragioni sono state identificate nelle differenti proprietà meccaniche dei terreni di fondazione e delle caratteristiche morfologiche, geologiche e geotecniche del sito.

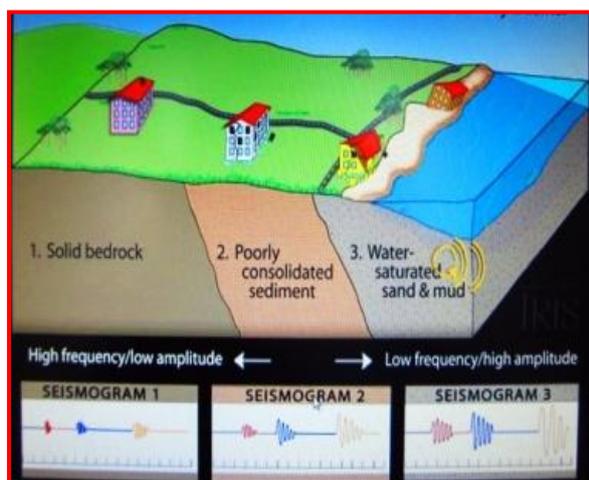


Figura 3: Differente comportamento sismico di edifici di analoghe caratteristiche (*IRIS*, https://www.youtube.com/watch?v=536xSZ_XkSs)

Per comprendere la natura del problema può essere utile osservare lo schema di Figura 3 che mostra come alcuni edifici di identiche caratteristiche possano subire un diverso danneggiamento per effetto della natura dei terreni. Come mostrano i sismogrammi sottostanti, le onde sismiche prodotte da un terremoto hanno diversi tempi di arrivo e diversa ampiezza perché interagiscono con i terreni attraversati

producendo diversi tipi di danneggiamento degli edifici.

Come si può osservare, si possono avere danni differenti sugli edifici in funzione delle caratteristiche del sottosuolo. Nella figura, in modo schematico e semplificato, forse anche un po' semplicistico, ma efficace, l'edificio costruito su roccia non subisce danni, quello su terreno poco consistente ma "stabile" subisce un danneggiamento limitato, quello su terreno sciolto un danneggiamento molto elevato e infine quello su terreno sabbioso saturo e poco addensato si ribalta a seguito di un fenomeno di liquefazione del terreno.

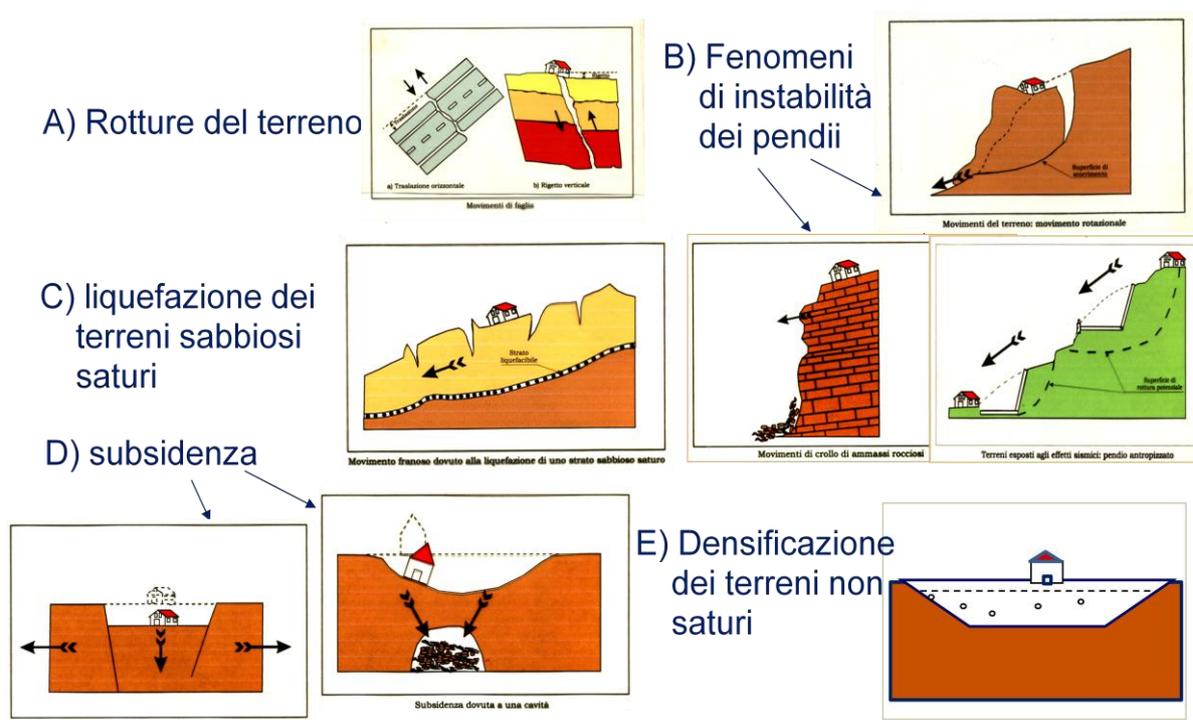


Figura 4: Scenari di instabilità dovuti alle interazioni tra onde sismiche e terreni (Crespellani, 1999)

L'esempio indica che i danni possono essere dovuti a due tipi fondamentali di fenomeni fisici:

- Amplificazione del segnale sismico che *non* comporta instabilità del terreno ("effetti di sito");
- Amplificazione del segnale sismico che comporta instabilità del terreno ("liquefazione", "densificazione").

Il caso esaminato mostra uno dei tanti scenari critici. Ma gli scenari di pericolosità legati alle condizioni locali sono infiniti. Nella Figura 4 sono schematizzati alcuni tipici scenari di rotture del terreno, movimenti franosi, abbassamenti del terreno dovuti a cavità, alla presenza di terreni sciolti, ecc.

Ci sono però anche effetti più innocenti e casalinghi (e talora anche non privi di poesia!) ma indicativi del fatto che i terreni sono estremamente sensibili al passaggio delle onde sismiche (Figura 5). Ma accanto agli effetti imponenti, è ormai ampiamente documentato che se ne aggiungono altri meno appariscenti ma capaci di influenzare in modo decisivo il comportamento delle strutture, e cioè gli "effetti di amplificazione locale". Alcuni terreni possono trasmettere infatti sollecitazioni nelle strutture notevolmente amplificate rispetto a quelle che si avrebbero se l'edificio fosse fondato su roccia o su terreno duro pianeggiante. Come si può vedere dalla Figura 6, che riporta le registrazioni accelerometriche ottenute a diverse profondità, nel passaggio dalla base dura e rocciosa (bedrock) alla superficie dei depositi, a causa delle interazioni tra onde sismiche e terreni, si sviluppano fenomeni di

risonanza, effetti dissipativi, di incremento ed accumulo delle pressioni interstiziali dell'acqua presente nei pori dei terreni, di decadimento della rigidità e della resistenza (effetti stratigrafici 1D), tanto più rilevanti quanto maggiore è lo spessore del deposito.



Figura 5: Affondamento di un'automobile e di sedie per perdita di capacità portante e vulcanelli di sabbia prodotti dalla liquefazione del terreno

Questi comportamenti hanno di fatto origine a livello di microelemento e sono strettamente legati alla rigidità del terreno in genere espressa tramite il parametro V_s , che indica la velocità con la quale si propagano le onde sismiche di taglio.

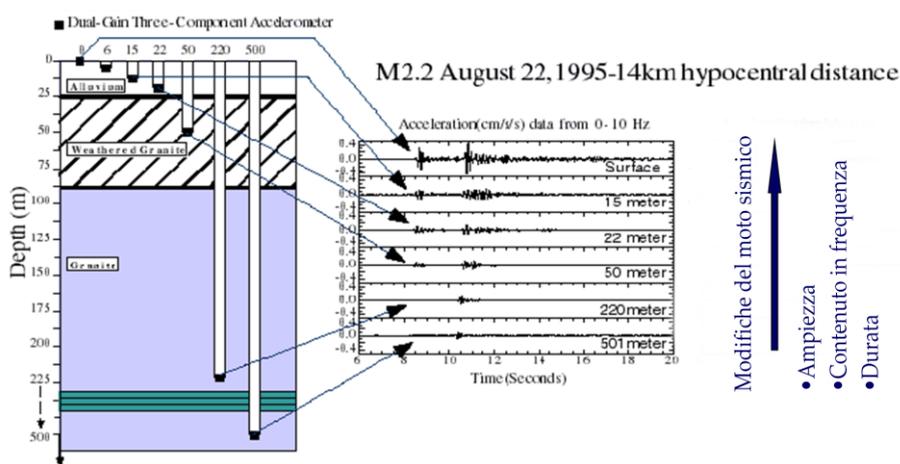


Figura 6: Effetti stratigrafici rilevati con la Garner Valley Downhole Seismographic Array

Ai bordi di depositi a tali fenomeni si possono aggiungere altri effetti legati alla riflessione e rifrazione delle onde sismiche nonché alla generazione e propagazione di onde superficiali all'interfaccia tra materiali di diversa rigidità (*effetti di bordo 2-3D*), ed è oggi noto che in corrispondenza di creste e di versanti possono aversi fenomeni di focalizzazione dell'energia delle onde sismiche, legati alla morfologia, che hanno come conseguenza un'amplificazione dell'ampiezza del moto sismico in particolari zone (*effetti topografici*) (Figura 7). Qualcosa del genere, anche se è presto per dirlo, in assenza di studi quantitativi, potrebbe essere avvenuto nel Comune di Amatrice in occasione del recente evento sismico che ha coinvolto la parte più orientale della Provincia di Rieti, al confine con l'Abruzzo e le Marche. Infatti, la distruzione quasi totale del centro storico, posto su una rocca, oltre ad essere certamente imputabile alla vulnerabilità dell'edilizia locale, potrebbe essere ascritta a un fenomeno di amplificazione del segnale sismico per effetti topografici, proprio in corrispondenza del periodo principale di oscillazione degli edifici crollati. Questo spiegherebbe perché

edifici altrettanto vulnerabili (almeno in apparenza) nelle vicinanze del nucleo storico di Amatrice hanno subito danni minori.

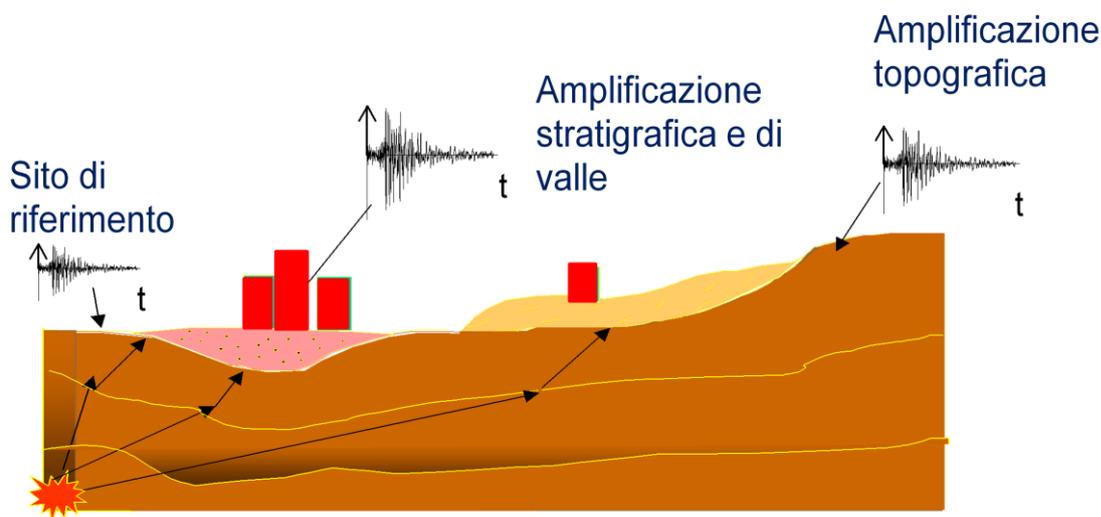


Figura 7: Modificazioni che il moto sismico subisce nell'attraversare i depositi e gli ammassi rocciosi superficiali rispetto al moto che si avrebbe su sottosuolo rigido con superficie topografica orizzontale ("Effetti di sito") (Crespellani, 2009)

4. OBIETTIVI DEGLI STUDI DI MZS

Secondo la sua classica definizione, con il termine microzonazione sismica si intende *"l'operazione tecnico-scientifica di suddivisione di un dato territorio in zone omogenee sotto il profilo della risposta a un terremoto di riferimento in arrivo al sito, valutata tenendo conto delle interazioni tra onde sismiche e condizioni geologiche, topografiche e geotecniche locali ("pericolosità sismica locale") che modificano la "pericolosità di base" (cioè la pericolosità valutata su terreno duro e pianeggiante di riferimento)"*. Come già osservato nel paragrafo 2, nel linguaggio sismico, per pericolosità sismica si intende *l'entità massima della scossa sismica attesa in un prefissato intervallo di tempo espressa in termini di accelerazione massima o in termini di altri parametri sintetici che possono essere significativi a livello della pianificazione urbanistica*.

Questa definizione racchiude il senso minimo di questo importante strumento di prevenzione e contiene *in nuce* i principali problemi scientifici con cui uno studio di MZS deve confrontarsi.

Gli assunti su cui si basa la MZS sono essenzialmente due:

- 1) ogni sito ha una diversa risposta al terremoto in arrivo in un dato territorio;
- 2) uno stesso sito ha una risposta diversa a seconda dell'energia del terremoto in arrivo.

Questo significa che il primo problema di uno studio di MZS è che occorre fissare *un terremoto di riferimento*, cioè un terremoto con un prefissato periodo di ritorno. In genere questo terremoto è convenzionalmente definito come il terremoto che ha un periodo di ritorno di 475 anni, ma potrebbe anche essere diverso. Perciò va precisato.

Il secondo problema è come valutare le diverse risposte dei terreni presenti in un dato territorio. Se noi ipoteticamente avessimo sulla superficie di questo territorio un numero elevatissimo di stazioni accelerometriche potremmo constatare che, durante un terremoto di energia pari a quella del terremoto di riferimento, in ragione delle diverse condizioni geologiche, morfologiche geotecniche

(condizioni locali) i valori del picco di accelerazione nei vari siti sarebbero in generale diversi da quelli registrati in un sito roccioso pianeggiante di riferimento.

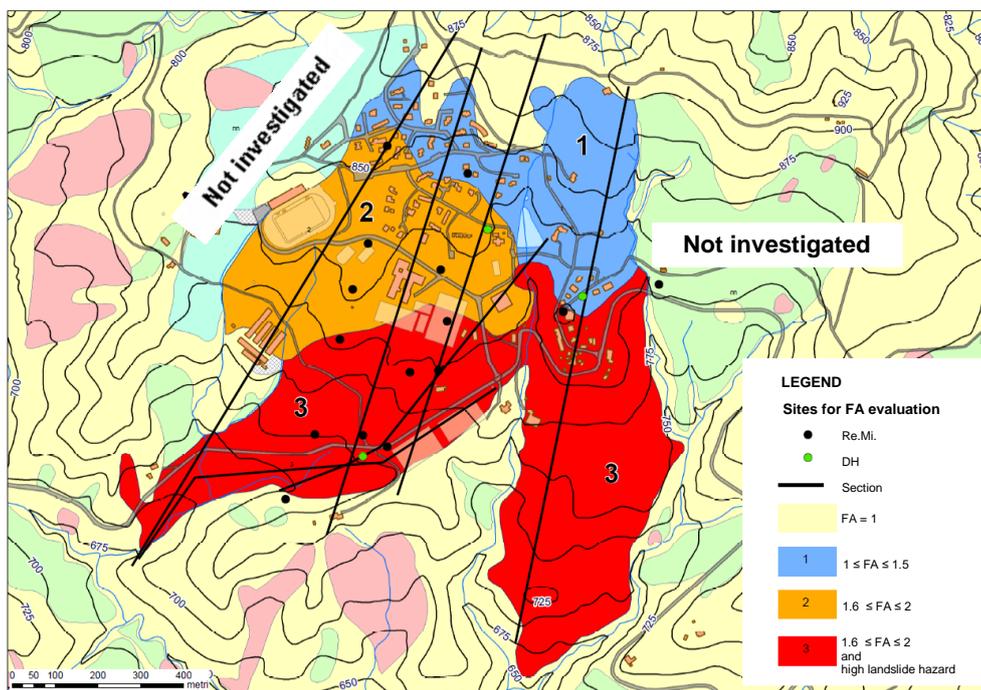


Figura 8: Carta di MZS di livello 3 a Spinello (Facciorusso et al., 2012)

Ma si potrebbe anche osservare che in alcune zone tali valori non si discostano di molto tra loro e che quindi è possibile individuare all'interno del territorio delle zone omogenee. Nella realtà, però, non si dispone di reti accelerometriche molto fitte né di dati registrati durante un terremoto pari a quella del terremoto di riferimento, perciò l'individuazione di queste zone viene fatta attraverso studi di carattere scientifico di tipo teorico ricorrendo a "modelli" definiti sulla base di indagini di diversa complessità e diffusione sul terreno, che prevedono calcoli ed elaborazioni, articolati e complessi.

Un terzo problema è quello della scelta dei "parametri sintetici" attraverso i quali definire l'amplificazione per potere associare ad ogni area omogenea individuata un "numero" indicativo del suo livello di pericolosità. Non è un problema di facile soluzione e perciò nella letteratura sismica la discussione è ancora in corso. Spesso si fa riferimento alla massima accelerazione orizzontale. In altri casi, forse più opportunamente, per le finalità di pianificazione urbanistica propria di tali studi, si tiene conto - anche se in modo semplificato - della tipologia edilizia nella zona, attraverso altri parametri come l'Intensità di Housner (Gruppo di Lavoro MS 2008).

Un quarto problema, infine, è la perimetrazione delle aree omogenee e la stesura della carta finale della MZS, una carta (in genere in scala 1:10.000) che, oltre ad essere scientificamente rigorosa, deve essere "leggibile" anche dai non tecnici (funzionari, amministratori, cittadini, ecc.). Un esempio di carta di MZS è riportato nella Figura 8. Va rilevato che, in genere, la perimetrazione va fatta generalmente su basi geologiche e geotecniche, cioè identificando le formazioni geologiche a partire da osservazioni di campagna e di sondaggi stratigrafici. Alla carta di MZS sono in associate anche altre carte di dettaglio che riportano altri parametri di interesse (valori del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione, periodo proprio dei terreni, ecc.).

Nel diagramma di flusso di Figura 9 sono riportate le operazioni necessarie per uno studio di Microzonazione Sismica. In tale diagramma è distinta in alto a sinistra la fase di zonazione sismica

nazionale (o regionale), a cui si è fatto riferimento in precedenza, mentre in altro a destra sono elencate le attività a scala locale.

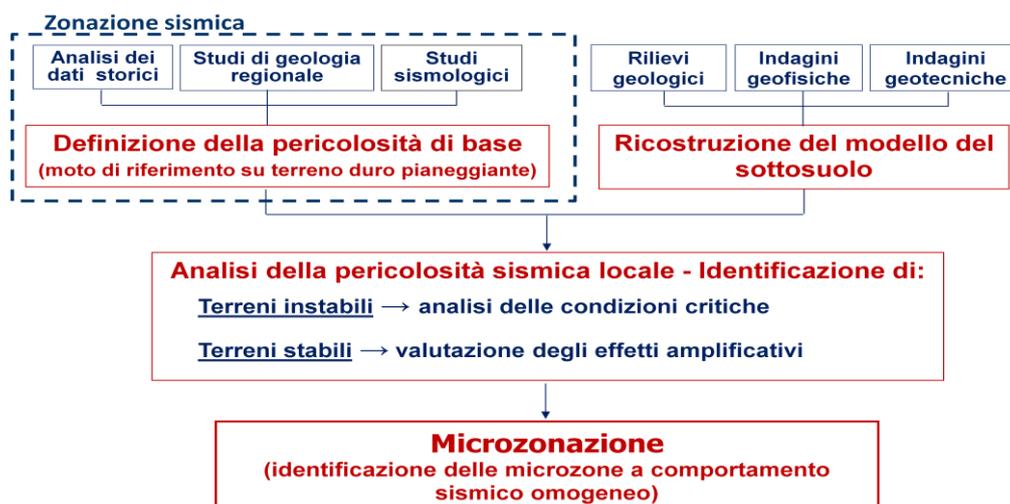


Figura 9: Diagramma di flusso per la redazione di uno studio di Microzonazione sismica

Uno studio di MZS viene quindi condotto in più fasi di cui quelle fondamentali relative all'ambito territoriale sono: la valutazione dell'amplificazione sismica locale e la stesura della carta di MZS. La prima richiede la determinazione del moto sismico (o, meglio, dei moti sismici) e la costruzione di un modello di sottosuolo. La stesura della carta di MZS esige due valutazioni fondamentali per le zone stabili e potenzialmente instabili. La prima operazione richiede una grande quantità di studi e di indagini. Per quanto riguarda il moto sismico oggi il problema è stato semplificato con la nuova classificazione del territorio nazionale.

Per quanto riguarda il modello di sottosuolo si richiede un incrocio di saperi di molte discipline. La seconda fase richiede anch'essa valutazioni e interpretazioni complesse spesso associate ad incertezze.

Le modalità tecniche di esecuzione degli studi di MZS e di stesura della carta di MZS sono oggi definite a scala internazionale dal Manuale TC4 (ISSMGE, 1999), a scala nazionale dagli Indirizzi e Criteri per la MZS redatti dal Gruppo di Lavoro per la Microzonazione sismica del Dipartimento della Protezione Civile (Gruppo di Lavoro MS, 2008) e dalle Linee Guida AGI (AGI, 2005), a scala regionale da eventuali indirizzi per gli studi di microzonazione sismica emessi dalle singole Regioni. In Emilia-Romagna gli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica finalizzati alla pianificazione territoriale e urbanistica" sono stati emessi nel 2007 (Regione Emilia Romagna, 2007).

5. LIVELLI DI APPROFONDIMENTO DEGLI STUDI DI MZS

A causa della complessità di uno studio di MZS, dei costi delle indagini e dei diversi obiettivi, sono previsti tre livelli di approfondimento che corrispondono a differenti metodologie di valutazione della pericolosità locale:

- livello 1 (L1): si tratta del livello base, spesso considerato come propedeutico ai veri e propri studi di MZS; si basa sulla raccolta di dati preesistenti, che vengono elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee in prospettiva sismica; la valutazione degli effetti amplificativi viene effettuata su basi geologiche;

- livello 2 (L2): associa alle zone omogenee dei parametri quantitativi di interesse ingegneristico, utilizzando a tale scopo ulteriori e mirate indagini; viene effettuata per mezzo di “abachi semplificati”, che definiscono i fattori di amplificazione degli spettri elastici in superficie, associati alle singole situazioni litostratigrafiche;
- livello 3 (L3): restituisce una *carta di microzonazione sismica con approfondimenti* su tematiche o aree particolari; per la valutazione quantitativa degli effetti occorre riferirsi a procedure specialistiche (differenti per i vari tipi di problemi: RSL, liquefazione, ecc.) che utilizzano programmi di calcolo complessi che richiedono dati di ingresso di alta qualità.

Tabella 1: Livelli di Microzonazione Sismica secondo ISSMGE (1999)

	Livello 1	Livello 2	Livello 3
Moto del terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Terremoti storici e informazioni disponibili • Carte Geologiche • Interviste con residenti 	<ul style="list-style-type: none"> • Microtremori • Studi geotecnici semplificati 	<ul style="list-style-type: none"> • Indagini geotecniche • Analisi della risposta del sottosuolo
Stabilità dei pendii	<ul style="list-style-type: none"> • Terremoti storici e informazioni disponibili • Carte Geologiche e Geomorfologiche 	<ul style="list-style-type: none"> • Foto aeree e rilievi satellitari • Rilievi in sito • Dati di pioggia e sulla vegetazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Indagini geotecniche • Analisi
Liquefazione	<ul style="list-style-type: none"> • Terremoti storici e informazioni disponibili • Carte Geologiche e Geomorfologiche 	<ul style="list-style-type: none"> • Foto aeree e rilievi satellitari • Rilievi in sito • Interviste con residenti 	<ul style="list-style-type: none"> • Indagini geotecniche • Analisi
Scale rappresentazione	1: 1.000.000 - 1:50.000	1:100.000 - 1:10.000	1:25.000 - 1:5.000

In Tabella I sono indicate in più dettaglio le specificità dei differenti livelli di Microzonazione Sismica, così come stabiliti dal TC4 dell'ISSMGE (1999). In particolare si nota come passando dal Livello 1 a quello 3 aumentino le risorse da impiegare in termini economici, di indagini e di mezzi di calcolo oltre che di professionalità più elevate. I prodotti che si possono ottenere con i tre livelli sono però qualitativamente molto differenti. Infine, al crescere del livello si incrementa la multidisciplinarietà dello studio, essendo il primo basato solo su informazioni di tipo geologico, mentre quello 3 richiede anche conoscenze e strumenti quantitativi tipici dell'ingegneria geotecnica.

Uno dei problemi che è ancora oggetto di dibattito scientifico è la scelta dei parametri ingegneristici per esprimere gli effetti amplificativi nelle aree stabili. Per il livello 2 negli Indirizzi e Criteri (Gruppo di lavoro per la MS, 2008) è stato introdotto un coefficiente di amplificazione che può essere dedotto da abachi riportati nel testo in funzione della velocità delle onde di taglio V_s e dello spessore H del deposito. Questa iniziativa facilita il compito dei professionisti incaricati di uno studio di MZS e dei funzionari delle amministrazioni addette ai controlli. Tuttavia, sulla procedura di Livello 2 prevista da tale documento esistono molte

perplexità in ambito scientifico, tanto che molti ricercatori del settore preferiscono considerare esclusivamente i Livelli 1, basato esclusivamente su considerazioni geologiche e dichiaratamente più qualitativo, e il Livello 3, che utilizza approcci più quantitativi propri della Dinamica dei Terreni.

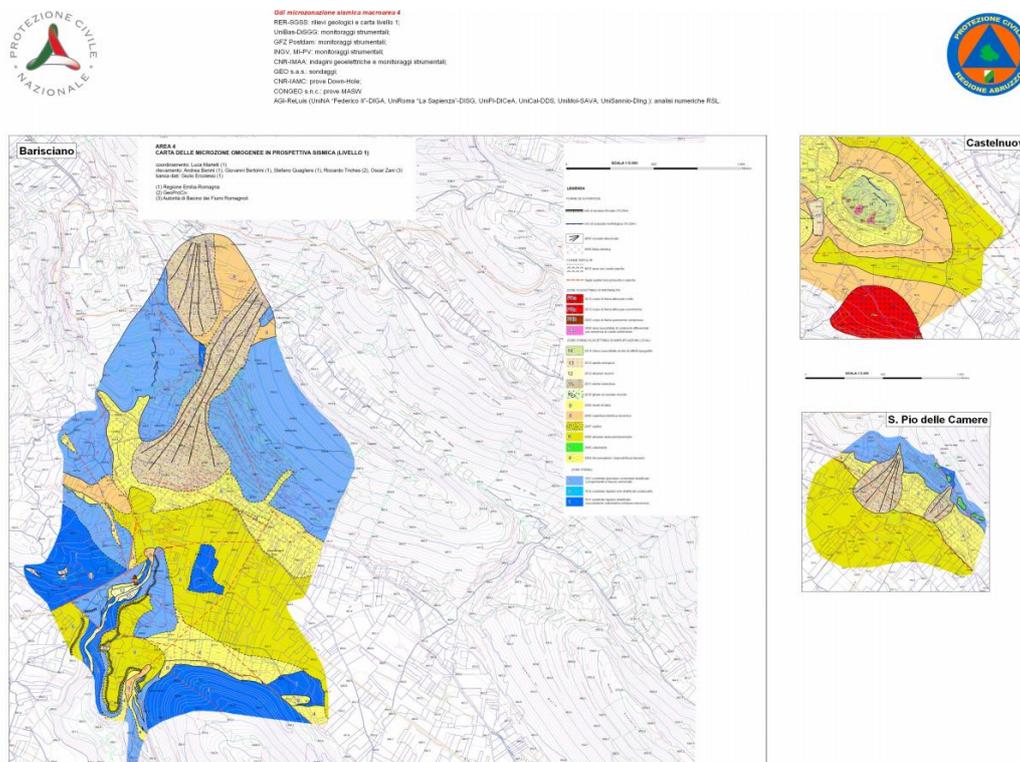


Figura 10: Carta di Microzonazione sismica di Barisciano di Livello 1 (Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010)

Nelle Figure 10 e 11 sono riportate due carte di MZS dello stesso comune, una di Livello 1 ed una di Livello 3, entrambe redatte dopo il terremoto de L'Aquila. La Carta di Livello 1 si è basata su studi esclusivamente geologici, mentre quella di Livello 3 è stata redatta da un team di esperti di diverse discipline. Pur senza entrare nel dettaglio delle due carte, appare evidente che alcune zone del territorio ritenute sismicamente omogenee nella MZS di livello inferiore sono state differenziate in quella di livello superiore.

6. PREVENZIONE E MZS

Per concludere, uno studio di MZS è essenzialmente un'operazione tecnico-scientifica, che richiede studi complessi e di tipo multidisciplinare. Ma ha anche una dimensione sociale, perché la conoscenza delle risposte dei vari siti al terremoto assunto come riferimento è una condizione imprescindibile per prendere decisioni riguardanti il governo del territorio.

Una carta di MZS, che fornisce elementi sul periodo proprio di vibrazione dei depositi nei siti destinati a nuovi insediamenti permette di definire altezze e volumetrie capaci di evitare che vi siano

fenomeni di doppia risonanza; indicando gli scenari di massima criticità legati ai terreni consente di localizzare aree verdi nelle zone più pericolose; individuando gerarchie di pericolosità aiuta a scegliere le zone più sicure per gli edifici strategici, a stabilire le priorità di intervento nelle zone abitate esistenti; permette di individuare i punti critici di infrastrutture e *lifelines*. Ma una carta di MZS è anche utile per la pianificazione dell'emergenza, ad esempio per la scelta delle aree di raccolta della popolazione, per l'insediamento delle strutture provvisorie, per la disposizione delle reti stradali di soccorso.

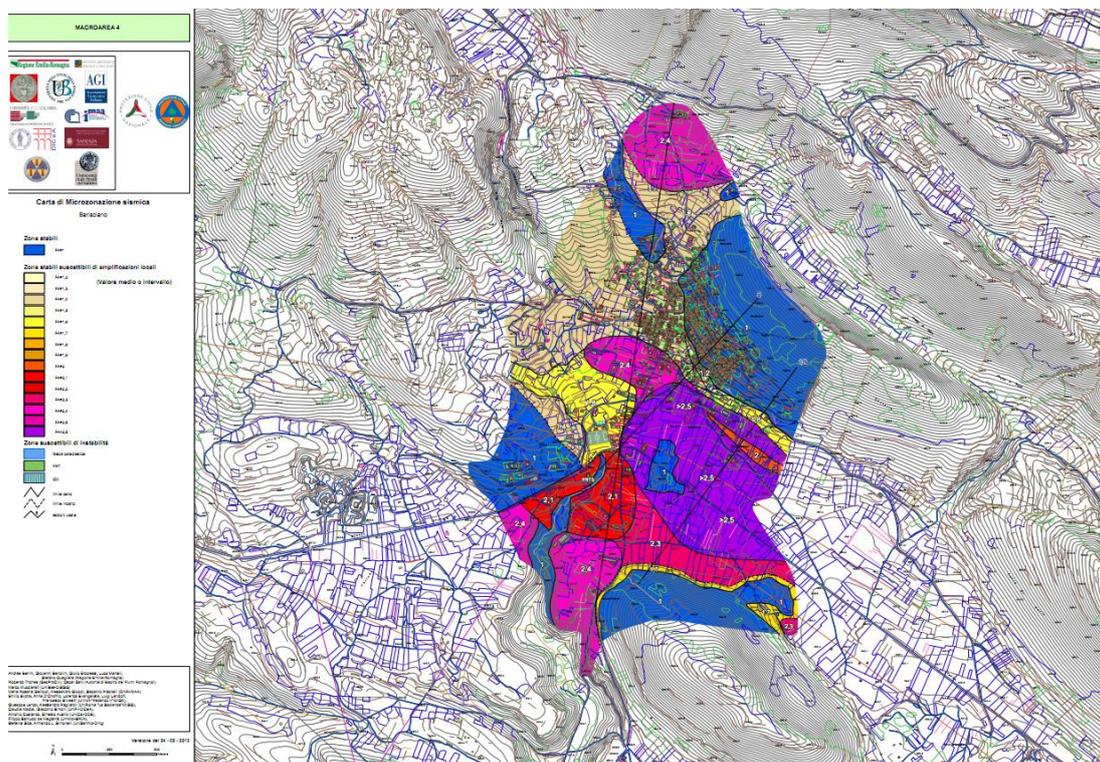


Figura 11: Carta di Microzonazione sismica di Barisciano di Livello 3 (Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010)

Infine, un carta di MZS è uno strumento fondamentale per la ricostruzione. Il terremoto rappresenta anche un' occasione di verifica della validità degli studi di MZS, ma apportare delle modifiche è ben più semplice che partire da zero. Una ricostruzione che voglia garantire condizioni di maggiore sicurezza rispetto al passato non può che partire dalla conoscenza aggiornata della risposta delle diverse zone e da una ripianificazione del territorio condotta sulla base di questa conoscenza. In definitiva, è uno strumento di conoscenza fondamentale nella:

- *pianificazione territoriale e urbanistica*
- *pianificazione e gestione dell'emergenza*
- *ricostruzione post-sisma*

ed è utile anche come strumento di base per gli studi propedeutici alla progettazione antisismica, oltre che per valutazioni specifiche di rischio sismico in area più vasta di quella della singola costruzione, ma che potrebbero coinvolgerla in caso ad esempio di movimenti franosi prodotti dal terremoto. Come già detto in precedenza, la MZS non è però mai sostitutiva degli studi di RSL per il progetto. La MZS è quindi a pieno titolo uno strumento di prevenzione, termine che, come noto,

comprende l'insieme delle azioni positive strutturali e non strutturali che possono rendere il patrimonio abitativo e il territorio più sicuri nei confronti degli eventi sismici in arrivo al sito.

7. UNA PROPOSTA CONCRETA

I recenti terremoti, tra cui quello che ha colpito il territorio reatino il 24 agosto 2016 e quelli che il 26 e il 30 ottobre 2016 hanno coinvolto la Valnerina, confermano sempre più che esiste in Italia un grave deficit di prevenzione sismica. Se non si provvede in tempi ragionevoli con politiche mirate e con una adeguata destinazione di fondi, l'Italia storica, ma anche quella più recente, rischia di "sfarinarsi", la parte storica perché vetusta e non consolidata, la parte più recente perché o è precedente alle leggi antisismiche, o perché i fabbricati sono stati costruiti senza il rispetto delle norme del buon costruire, o perché situati in zone ad alta pericolosità locale, non nota ai tempi della loro costruzione, o infine perché sono addirittura abusivi. Se dovesse verificarsi un terremoto nell'area dell'arco calabro, come quello di Messina del 1908, le città di Reggio Calabria e Messina sarebbero fortemente distrutte con gravissime perdite di vite umane, visto che il 90% delle costruzioni rientrano in queste categorie.

Si tratta di un quadro assolutamente realistico e che potrebbe buttare nello sconforto. Ma va rilevato che dal punto di vista tecnico lo stato delle conoscenze sismiche in Italia è molto avanzato e alcune direttrici di movimento, identificate già in tempi lontani nella relazione di Grandori e Barberi al Presidente Pertini dopo i terremoti del Friuli del 1976 e ancora attuali, sono piuttosto chiare.

A scala nazionale, la mappa di classificazione del territorio italiano, riportata nella Figura 1, rappresenta un saldo punto di riferimento per la predisposizione degli strumenti di prevenzione alle altre scale. Analogamente le NTC 2008, garantiscono, se rigorosamente rispettate, un ottimo livello di protezione antisismica per le nuove costruzioni.

Sia a scala nazionale sia a scala locale, l'aspetto più carente è la cartografia geologica. È quanto mai urgente il completamento della cartografia geologica del territorio nazionale alla scala 1:50.000 (progetto CARG che fino ad ora ha coperto circa il 50% del Paese), ma, soprattutto, nell'ottica della MZS e quindi della pianificazione urbanistica, è indispensabile fare in modo che tutti i centri abitati abbiano una carta geologica alla scala 1:10.000, in quanto rappresenta la base conoscitiva minima indispensabile per la riduzione a scala locale del rischio sismico dei sistemi urbani e del territori.

Se tutti i centri abitati si potessero, poi, dotare di carte di MZS sarebbe per il nostro paese un buon traguardo di civiltà. Giova ricordare a tale proposito alcuni esempi virtuosi, tra cui quello della Regione Umbria che, dopo il terremoto dell'Umbria-Marche del 1997, promosse nei primi tre mesi dopo il terremoto la realizzazione in trenta centri abitati di carte geologiche 1:10.000, che furono la base per la stesura della carta di MZS di livello 1. Nei centri più importanti furono anche condotti studi di MZS di livello 3. Analoghe iniziative anche se meno estese, perché il territorio fu meno colpito dal terremoto, furono avviate anche nella Regione Marche. A Fabriano sono stati condotti studi di MSZ di livello 3 (Marcellini e Tiberi, 2000). Successivamente in queste due Regioni altri studi di MZS sono stati condotti in centri di speciale interesse regionale. Particolarmente lodevoli sono poi gli studi MZS promossi dalla Regione Emilia Romagna, che già da molti anni, in tempo di silenzio sismico, ha intrapreso una serie di iniziative funzionali alla MZS (Martelli e Romani, 2012; Facciorusso, 2012), quali la realizzazione di un imponente banca dati, di carte geologiche al 10.000 in tutta la regione, la stesura di indirizzi e criteri per uniformare gli studi di MSZ finalizzati alla pianificazione urbanistica, la formazione di professionisti e di tecnici esperti in MZS, la creazione di un dialogo tra amministrazioni regionali e comunali per la promozione di studi di MZS. Studi di Microzonazione sismica (Lanzo et al., 2011; Gruppo di Lavoro MS-AQ, 2010) sono stati anche condotti in vari Comuni della Valle dell'Aterno dopo il Terremoto de L'Aquila.

Appare però importante che gli studi di Microzonazione Sismica nei vari comuni siano redatti, con approccio multidisciplinare e attenendosi agli indirizzi e criteri del Gruppo di Lavoro MS (2008) e ad altri eventuali indirizzi regionali, da professionisti specificamente formati e che i prodotti ottenuti siano soggetti a verifiche da parte di enti regionali o statali, per ottenere sul territorio nazionale o almeno su quello regionale prodotti di livello qualitativamente analoghi e, comunque, affidabili.

Per quanto riguarda le costruzioni esistenti, il loro rafforzamento passa, come ben noto, attraverso due fondamentali tipi di misure: l'*adeguamento sismico* (che consiste nell'applicare in modo rigoroso per il consolidamento degli edifici esistenti le norme per le costruzioni in zona sismica) e il *miglioramento sismico* (che consiste nell'apportare interventi quali catene, controventature, cuciture, ecc., in modo da ridurre il rischio di crollo, pur accettando un certo livello di danno in occasione dell'evento sismico). Il primo tipo di misura è piuttosto costoso e richiede tempi lunghi. Il secondo è invece economicamente accettabile e realizzabile in tempi brevi. Se si potesse estendere il miglioramento sismico a tutto il patrimonio abitativo esistente, adeguando sismicamente solo gli edifici strategici, già si potrebbe conseguire un buon livello di protezione, soprattutto al fine della salvaguardia delle vite umane.

L'ultimo passo è dotare tutti i centri abitati di strumenti urbanistici che tengano conto sia degli aspetti relativi alla sicurezza sia quelli della tutela dei valori identitari e della bellezza.

Quello che occorre è una precisa scelta politica di fare dell'Italia un grosso cantiere per la sua messa in sicurezza e per la salvaguardia del suo patrimonio storico, paesaggistico e produttivo, coinvolgendo amministrazioni dello stato, regionali e comunali, università, esperti, impresari, insegnanti e cittadini. La prevenzione è cultura diffusa e polifonica.

Poiché le risorse sono sempre limitate, occorre fare alcuni importanti scelte, quali ad esempio, quella proposta da De Marco (2016) di concentrare le risorse alla riduzione del rischio sismico dei comuni dell'asse appenninico segnato in viola nella carta di classificazione di Figura 1. In tutti questi comuni, dove si attendono gli effetti di terremoti di Magnitudo superiore a 5.5, il riferimento centrale dovranno essere gli strumenti urbanistici, redatti con corretti criteri di pianificazione inclusivi degli aspetti di conservazione dei caratteri identitari e delle misure precauzionali per la riduzione del rischio sismico desunte dalle carte di MZS e dalle normative. A tali strumenti devono essere conformati, in caso di eventi sismici distruttivi, gli interventi di ricostruzione.

REFERENCES

AGI (2005). *Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica*. Bologna, IT: Patron Editore

Cascini, L. (2014). Criteri di analisi e gestione del rischio da frana: dal Governo centrale alle comunità locali. *Atti del XXV Convegno Nazionale di Geotecnica: La geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali* (pp.103-150). Baveno, (VB) 4-6 giugno 2014. Roma, IT: Edizioni AGI, Vol.1.

Crespellani, T. (1999). Effetti di sito e fenomeni di instabilità indotti dai terremoti nei depositi e nei pendii. In T. Crespellani (ed.), *Ingegneria Geotecnica nelle aree sismiche* (pp. 1-23). Udine, IT: CISM - International Centre for Mechanical Sciences.

Crespellani, T. (2009). Valutazione della risposta sismica locale. I metodi geotecnici. *Corso universitario di perfezionamento su "La valutazione della risposta sismica locale ai fini antisismici"*. SERMA - 2 Edizione - Venzone -Agosto-Settembre 2009, Università degli Studi di Udine - Facoltà di Ingegneria. Dipartimento di Georisorse e Territorio -Centro Studi e Ricerche Sprint.

Crespellani, T. (2014). Seismic Microzoning in Italy: A Brief History and Recent Experiences. *Ingegneria Sismica*, 21(2), 3-31.

- Crespellani, T., & Martelli, L. (2008). Microzonazione sismica e Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008). *Ingegneria sismica*, 2, 51-54.
- Crespellani, T. (2012). Microzonazione sismica: obiettivi e principi fondamentali. In J. Facciorusso (ed.), *Microzonazione sismica: uno strumento consolidato per la riduzione del rischio. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna*, (pp. 83-104). Bologna, IT: Centro Stampa Regione Emilia-Romagna.
- De Marco, R. (2016). Dopo Amatrice, niente interventi a pioggia. Redazione Associazione Ranuccio Bianchi Bandinelli. Retrieved from <http://www.bianchibandinelli.it/2016/09/09/>
- De Marco, R., Frisch, G. J., & Nicita, P. (2011). 1861-2011 Centocinquant'anni. Gli italiani e la difesa dalle catastrofi. *Video su un'idea di Roberto De Marco. Personal Communication.*
- De Marco, R. (2014). Ricostruzioni: l'estemporaneità come regola. *Economia della Cultura* 24(3-4), 295-302.
- Facciorusso, J. (2012). *Microzonazione sismica: uno strumento consolidato per la riduzione del rischio. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna*. Bologna, IT: Centro Stampa Regione Emilia-Romagna.
- Facciorusso, J., Madi ai, C., & Vannucchi, G. (2012). A grade-3 method of zonation for seismic slope stability: An Italian case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 96-110.
- Facciorusso, J., Madi ai, C., & Vannucchi, G. (2015). CPT-Based Liquefaction Case History from the 2012 Emilia Earthquake in Italy. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE*, 1-17.
- Fioravante, V., Abate, G., Giretti, D., Aversa, S., Boldini, D., Crespellani, T., Dezi, F., Facciorusso, J., Ghinelli, A., Grasso, S., Lanzo, G., Madi ai, C., Massimino, M. R., Maugeri, M., Tropeano, G., Santucci de Magistris, F., Sica, S., Silvestri, F., & Vannucchi, G. (2013). Earthquake Geotechnical Engineering Aspects: the 2012 Emilia-Romagna Earthquake (Italy). *Proceedings of the Seventh Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Invited Lecture No. EQ-5. Wheeling, IL (Chicago, IL Area) – April 29-May 4, 2013. EQ-5,1-34.
- Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010). *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. and Cd-Rom.
- Gruppo di Lavoro per la MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome-Dipartimento della Protezione Civile. <http://www.protezionecivile.gov.it/cms/index.php>
- IRIS, retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=536xSZ_XkSs
- ISSMFE (1999). *Manual for Zonation of Seismic Geotechnical hazards*. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo.
- Lanzo, G., Silvestri, F., Costanzo, A., d'Onofrio, A., Martelli, L., Pagliaroli, A., Sica, S., & Simonelli, A.L. (2011). Site response studies and seismic microzoning in the Middle Aterno valley (l'Aquila, Central Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(5), 1417-1442.
- Madi ai, C., Facciorusso, J., Gargini, E., Vannucchi, G., & Baglione, M. (2014). A methodology for advanced seismic microzoning using 2D analyses: the case study of Barberino di Mugello, Florence, Italy. *Proc. IAEG XII CONGRESS*, Torino, IT, September 15-19, 2014.
- Marcellini, A., Tiberi, P. (2000). *La microzonazione sismica di Fabriano*. Biemmegraf Macerata.
- Martelli, L., Calabrese, L., Ercolessi, G., Severi, P., Romani, M., Tarabusi, G., Pileggi, D., Rosselli, S., Minarelli, L., Pergalani, F., Compagnoni, M., Vannucchi, G., Madi ai, C., Facciorusso, J., Fioravante, V., Giretti, D., Mucciarelli, M., Priolo, E., Laurenzano, G., Brammerini, F., Speranza, E., Conte, C., Di Salvo, G., Giuffrè, M., Zuppirol, M., Guidi, F., Vona, V., Manicardi, A., Mengoli, B., Ugoletti, C., & Ricci, L. (2013a). Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura emiliana del 2012 (Ord. 70/2012). *Atti del 32° Convegno nazionale GNGTS. Tema 2: Caratterizzazione sismica del territorio*, (pp.428-433). Trieste, 19-21 novembre 2013. Trieste, IT: Mosetti Tecniche Grafiche.
- Martelli, L., Calabrese, L., Ercolessi, G., Severi, P., Tarabusi, G., Pileggi, D., Rosselli, S., Minarelli, L., Pergalani, F., Compagnoni, M., Vannucchi, G., Madi ai, C., Facciorusso, J., Fioravante, V., Giretti, D., Mucciarelli, M., Priolo, E.,

Laurenzano, G., Romani, M., Manicardi, A., Mengoli, B., Ugoletti, C., & Ricci, L. (2013b). Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). *Atti del 32° Convegno nazionale GNGTS. Tema 2: Caratterizzazione sismica del territorio*, 262-266. Trieste, 19-21 novembre 2013. Trieste, IT: Moseetti Tecniche Grafiche.

Martelli, L., & Romani, M. (2012). Politiche regionali in tema di microzonazione sismica. In J. Facciorusso (ed.), *Microzonazione sismica. Uno strumento consolidato per la riduzione del rischio. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna*, (pp.25-35). Bologna, IT: Servizio geologico sismico e dei suoli, Centro Stampa della Regione Emilia-Romagna.

NTC (2008). *Norme Tecniche per le Costruzioni*. DM 14/1/2008. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 29 del 4/2/2008, S.O. n. 30.

Regione Emilia-Romagna (2007). *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Delibera dell'Assemblea legislativa progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2.V.2007 <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica>

Silvestri, F., & d'Onofrio, A. (2015). Risposta sismica di centri abitati e infrastrutture. *Atti del XXV Convegno Nazionale di Geotecnica: La geotecnica nella difesa del territorio e delle infrastrutture dalle calamità naturali* Baveno (VB) 4-6 giugno 2014. Roma, IT: Edizioni AGI, Vol.1.

Terremoto di Taiwan, (1999), <https://www.youtube.com/watch?v=8cqQJCmcLWQ>.