

PROPOSTA DI CLASSIFICAZIONE E AZIONI SISMICHE DA APPLICARE AL TERRITORIO ITALIANO

PROPOSED SEISMIC CLASSIFICATION OF ITALY AND RELATED ACTIONS

ALBERTO PRESTININZI(*), ANTONIO PUGLIESE(**), ROBERTO W. ROMEO(***)

(*) University of Rome "La Sapienza" - Research Center CERI on "Prediction, Prevention and Mitigation of Geological Risks" - Valmontone, Italy - alberto.prestininzi@uniroma1.it

(**) APAT - Agency for Environmental Protection and Technical Services - Rome, Italy - antonio.pugliese@apat.it

(***) University of Urbino "Carlo Bo" - Urbino, Italy - rwomeo@uniurb.it

RIASSUNTO

Nel presente lavoro sono illustrati i risultati di uno studio che analizza, alla luce della sismicità della penisola italiana, ipotesi alternative alla classificazione del territorio ed orientate alla definizione delle azioni sismiche da utilizzare sia nella progettazione di nuove strutture sia per l'adeguamento di opere esistenti. I risultati ottenuti sono messi a confronto con i contenuti dell'OPCM n° 3274/03 e del Testo Unico, derivante dal DPR n° 380/2001. Le considerazioni riportate nello studio sono basate su una stima di pericolosità sismica *ad hoc* effettuata utilizzando i dati di base più recenti disponibili in letteratura.

La tecnica di accorpare i comuni in zone appartenenti alla medesima categoria genera azioni superiori, e in taluni casi inferiori, a quelle rappresentative della reale sismicità. Tale effetto è causato anche dalla decisione di adottare la medesima forma spettrale per definire l'azione sismica di tutte le zone.

Per ovviare a questo inconveniente, nel presente lavoro viene suggerita una soluzione alternativa che tiene conto della specifica sismicità del territorio di competenza dei comuni, in modo da garantire una più omogenea distribuzione dei livelli di pericolosità e del conseguente rischio accettato per tutti i comuni. Ciò è ottenuto sostituendo alla classificazione basata su "zone sismiche", la definizione dell'azione sismica "comune dipendente". Al riguardo, viene illustrata una procedura da applicare allo spettro di pericolosità al fine di ottenere uno spettro elastico di forma regolarizzata.

Inoltre, la consapevolezza che la distribuzione dei terremoti sul territorio italiano, in termini di frequenza/intensità, assume specifici caratteri nelle diverse aree porta a definire azioni sismiche differenti per le due condizioni di Stato Limite Ultimo (SLU) e Stato Limite di Danno (SLD).

TERMINI CHIAVE: *Italia, classificazione sismica, pericolosità sismica, azione sismica*

INTRODUZIONE

Nel maggio 2003 il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri ha emanato, con una propria

ABSTRACT

The paper reports the results of a study conducted on the classification of Italian seismic zones. The study investigated seismic classification alternatives, identifying actions to be applied to the design of new structures and to the retrofitting of existing ones for seismic compliance. The findings from the study were compared with the contents of Prime Minister's Decree 3274/03 and with the Consolidated Text of provisions arising from Decree of the President of the Republic no. 380 of 6 June 2001. An *ad-hoc* seismic hazard estimation, based on the latest data available in the literature, supports the considerations made in the paper.

Under the above Regulations, Italian municipalities are grouped into zones belonging to the same "seismic category" and the same spectral shape is used for defining the seismic action of all zones. These choices result into seismic actions that are more severe (or, in some cases, less severe) than the ones representing actual seismicity.

To redress this situation, the paper suggests an alternative taking into account the specific seismicity of each municipality, so as to obtain a more homogeneous distribution of hazard levels (and of the related accepted risk) among municipalities. This goal is achieved by replacing the classification based on "seismic zones" with the definition of a "municipality-specific" seismic action. The paper describes an approach to be applied to the hazard spectrum with a view to obtaining a regularised shape of the elastic spectrum.

Moreover, as earthquakes have different distribution, frequency and intensity in the various zones of the country, different seismic actions should be defined for the Ultimate Limit State (ULS) and for the Damage Limit State (DLS).

KEY WORDS: *Italy, seismic classification, seismic hazards, seismic action*

INTRODUCTION

In May 2003, the Presidency of the Council of Ministers' Civil Protection Department issued a Decree on "Criteria for identification

Ordinanza, i “Criteri per l'individuazione delle zone sismiche...” nonché le “Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici” (OPCM 3274/03) la cui entrata in vigore è stata oggetto di reiterate proroghe. Alla data in cui viene redatto il presente lavoro è in corso di approvazione il Testo Unico “Norme Tecniche per le Costruzioni”, già approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 30 marzo 2005, con voto n° 35/2005.

Entrambe le iniziative avviano di fatto, nel nostro Paese, quel processo di omogeneizzazione delle normative tecniche in vigore nei paesi dell'Unione Europea alle indicazioni contenute nell'Eurocodice 8 (CEN, 2002). Inoltre, per argomenti quali classificazione del territorio e definizione dell'azione sismica esse rappresentano una notevole evoluzione della normativa nazionale.

In relazione a quest'ultimi aspetti, il presente studio, basato anche sui più moderni orientamenti delle normative sismiche internazionali (ATC, 2000; BSSC, 2001; SEI/ASCE 7-02, 2002), propone una ulteriore evoluzione della normativa al fine di renderla più aderente alle caratteristiche sismiche del territorio italiano.

CLASSIFICAZIONE E AZIONE SISMICA DI NORMA

Nel seguito si richiamano i principi su cui sono fondate le due recenti normative sismiche, che presentano una sostanziale equivalenza. Tutte le considerazioni che seguono ed i confronti appresso mostrati si riferiscono a condizioni di sito rigido di riferimento (rocce o terreni rigidi con $V_s > 750$ m/s; categoria A di suolo di fondazione). Sono esclusi dal presente studio le valutazioni ed i confronti concernenti le altre categorie di sito, forti della considerazione che la risposta sismica locale non possa prescindere dalla reale conoscenza delle condizioni geologiche di sito e, quindi, da studi di microzonazione.

Elementi essenziali e comuni delle due normative sono:

1) il territorio nazionale è suddiviso in 4 zone sismiche ciascuna caratterizzata da una accelerazione orizzontale di picco (PGA) su suolo rigido di riferimento pari a 0.35-0.25-0.15-0.05g, per le zone 1-2-3-4, rispettivamente. Le accelerazioni di picco sono calcolate con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, corrispondenti a un periodo di ritorno di 475 anni;

2) l'azione sismica orizzontale di riferimento per lo stato limite ultimo (SLU) è descritta da uno spettro di risposta elastico ancorato, in ciascuna zona, al corrispondente valore del PGA. La forma spettrale è la medesima in tutte le zone ed è mostrata in figura 1. Questa, in particolare, coincide con lo spettro type-I dell'EC8 valido per alta sismicità ($M_s > 5,5$). Elementi caratterizzanti lo spettro sono i periodi T_a , T_v , T_d , che segnano l'inizio dei rami, rispettivamente, ad accelerazione, velocità e spostamento costanti, nonché il plateau dello spettro, che è fissato a 2.5 volte il valore del PGA;

3) l'azione sismica verticale viene assunta pressoché coincidente con quella orizzontale, salvo un lieve innalzamento del plateau in accelerazione e un suo restringimento con spostamento verso i bassi periodi.

L'azione che caratterizza lo stato limite di danno (SLD) presenta una sostanziale differenza tra le due norme. Infatti, il DPCM 3274/03

of seismic zones...”, as well as on “Technical rules for design, assessment and retrofitting of building for seismic compliance” (Prime Minister's Decree 3274/03). However, the entry into force of the Decree was repeatedly postponed. Upon the date of writing this paper, the Consolidated Text of Technical Rules for Buildings (already approved by the Higher Council of Public Works on 30 March 2005, Decision 35/2005) was being approved.

With these Regulations, Italy has started the process of harmonisation of technical rules that is already under way in the countries of the European Union, in line with Eurocode 8 (CEN, 2002). Moreover, in terms of classification of seismic zones and related actions, the Regulations marked a significant advance in national legislation.

This study, which is based on the most advanced international seismic standards (ATC, 2000; BSSC, 2001; SEI/ASCE 7-02, 2002), proposes a further advance in the applicable legislation, with a view to making it more reflective of Italy's seismic characteristics.

SEISMIC CLASSIFICATION AND ACTION UNDER THE APPLICABLE REGULATIONS

The following paragraphs outline the principles underlying the two recent Italian seismic Regulations, which are practically equivalent. Considerations and comparisons refer to a "stiff" reference site (hard-rock or other rigid rock-like geological formation with $V_s > 750$ m/s; category A of foundation soil type). The study excludes other site categories, since the understanding of local seismic response calls for an in-depth knowledge of the geology of the site and thus for microzoning studies.

The essential and common elements of the two Regulations are as follows:

1) the country is divided into 4 seismic zones, each with a horizontal peak ground acceleration (PGA) on the reference stiff soil of 0.35-0.25-0.15-0.05g for zones 1-2-3-4, respectively. Peak accelerations are computed with a 10% probability of exceedance in 50 years, corresponding to a return period of 475 years;

2) the reference horizontal seismic action for the Ultimate Limit State (ULS) is described by an elastic response spectrum, which is associated with the corresponding PGA value in each zone. The spectral shape is identical in all the zones (Fig. 1). This shape coincides with the EC8 type-I spectrum applicable to high seismicity ($M_s > 5.5$). The typical elements of the spectrum are the T_a , T_v and T_d periods (identifying the beginning of the constant acceleration, velocity and displacement branches, respectively) and the spectrum plateau (2.5 times the PGA value);

3) the vertical seismic action is assumed to practically match the horizontal one, except for a slight rise in the acceleration plateau and its narrowing and shifting towards low periods.

The action characterising the Damage Limitation State (DLS) differs significantly between the two Regulations. Prime Minister's Decree 3274/03 does not alter the spectral shape of the ULS but

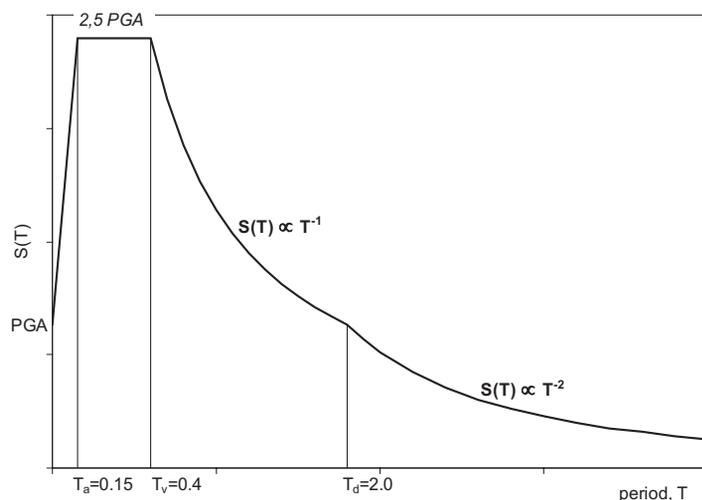


Fig. 1 - Forma spettrale definita dalle norme vigenti
- Spectral shape defined by the applicable Regulations

non modifica la forma spettrale dello SLU ma riduce semplicemente lo spettro elastico di un fattore pari a 2,5. Nel T.U. i valori di accelerazione da adottare sono quelli corrispondenti ad una probabilità di eccedenza specifica delle azioni di riferimento (50% in 50 anni, per le strutture poste in Classe 1, e 30% in 50 anni, per quelle in Classe 2). Le forme spettrali per le azioni SLD, da ancorare ai valori di accelerazione sopra indicate, sono differenti da quelle previste per le azioni SLU.

Nel presente studio il confronto è limitato alle opere appartenenti alla Classe 1, ossia alle strutture ordinarie prive di una particolare condizione di rischio o di importanza strategica ai fini delle operazioni di protezione civile.

Salvo diversa specificazione, nella prosecuzione del lavoro sarà utilizzato il termine generico di Norma per indicare le due normative.

PERICOLOSITÀ SISMICA

Per il presente studio è stata eseguita un'apposita analisi di pericolosità tenendo presente i 3 requisiti fondamentali stabiliti dal OPCM n° 3274/03 (art. 2 comma c) dei Criteri per l'individuazione delle zone sismiche, ossia: i) metodologie recenti e accettate a livello internazionale; ii) dati di base aggiornati; iii) procedure di elaborazione trasparenti e riproducibili.

I dati di base utilizzati sono i seguenti:

- a) catalogo dei terremoti CPTI2 (INGV, 2004a);
- b) zonazione sismogenetica del GNDT ZS4 (MELETTI *et alii*, 2000) con la variante di suddivisione della ZS63 (Campano-Lucana) in 63N (Irpinia) e 63S (Daunia), introdotta da ROMEO & PUGLIESE (2000).
- c) relazioni di attenuazione di SABETTA & PUGLIESE (1996) valide per il territorio Italiano e riferite sia alla componente orizzontale che a quella verticale del moto.

La valutazione della pericolosità è stata condotta con riferimento al metodo di CORNELL (1968) applicando la seguente procedura:

merely decreases the elastic spectrum by a factor of 2.5. Conversely, in the Consolidated Text of Technical Rules, the acceleration values to be used correspond to a specific probability of exceedance of the reference actions (50% in 50 years for Class 1 structures and 20% in 50 years for Class 2 structures). The spectral shapes for the DLS actions, to be associated with the above-mentioned acceleration values, are different from those specified for the ULS actions.

In this study, the comparison is confined to Class 1 structures, i.e. ordinary structures having no particular risk or no strategic importance for civil protection purposes.

Unless otherwise specified, the following section of the paper will use the word "Regulations" (or "regulatory") for both Regulations.

SEISMIC HAZARD

In this study, an ad-hoc hazard assessment was made on the basis of the 3 fundamental requirements established by Prime Minister's Decree 3274/03 (art. 2, para. c) concerning Criteria for identification of seismic zones, i.e. i) internationally accepted and recent approaches; ii) updated basic data; iii) transparent and repeatable data processing.

The basic data are as follows:

- a) catalogue of earthquakes CPTI2 (INGV, 2004a);
- b) seismogenetic zoning GNDT ZS4 (MELETTI *et alii*, 2000), as modified by ROMEO & PUGLIESE (2000) by dividing zone ZS63 (Campania-Lucania) into 63N (Irpinia) and 63S (Daunia);
- c) attenuation relations, as proposed by SABETTA & PUGLIESE (1996); these relations, that are valid for Italy, refer to both horizontal and vertical components of motion.

The hazard assessment was conducted according to Cornell's method (1968), by applying the following procedure:

- 1) geometric assignment of events to seismic zones (ZS) without using background zones;

- 1) attribuzione geometrica degli eventi alle zone sismiche (Z.S.), senza utilizzo di zone background;
- 2) completezza ricavata con il metodo della derivata temporale del numero cumulato di eventi;
- 3) valori del parametro "b" della relazione di Gutenberg-Richter ricavati per macroaree (Fig. 3) e quindi applicati ad ogni singola zona sismogenetica con i pertinenti tassi di sismicità;
- 4) magnitudo massima di ciascuna zona coincidente con il massimo storicamente osservato/stimato indipendentemente dal periodo di completezza;
- 5) parametri spettrali calcolati tenendo conto dell'incertezza aleatoria fornita dalle leggi di attenuazione;
- 6) territorio nazionale suddiviso in una griglia calcolo avente 5 Km di lato.

Il periodo di completezza di ogni classe di magnitudo (figura 2) ha inizio a partire dal valore massimo assunto dalla funzione dN/dT , verificato che tale periodo non sia comunque inferiore a quello della classe di magnitudo immediatamente più alta. Le classi di magnitudo utilizzate sono le medesime di quelle riportate nello studio di pericolosità recentemente prodotto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, 2004b) per ottemperare ai requisiti di zonazione sismica previsti dall'OPCM 3274/2003.

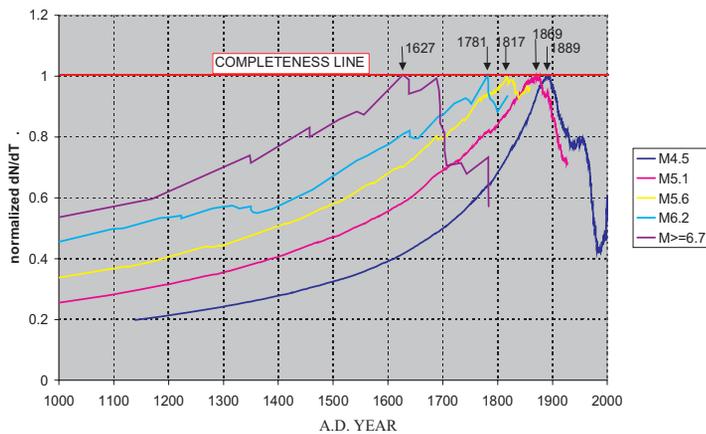


Fig. 2 - Periodo di completezza per classi di magnitudo
- Completeness period by magnitude class

I risultati riportati in figura 3 mostrano la distribuzione della PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (475 anni di tempo di ritorno), dalla quale si evince che il valore di 0.35g fissato dalla norma per la classe 1 risulta superato per alcune aree dell'Italia meridionale e centrale.

La diversa sismicità del territorio italiano può essere evidenziata anche dal rapporto dei valori di PGA al 2% e al 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni. L'esame della figura 4 mostra come parte dei comuni Italiani esibiscono un rapporto intorno a 1.5. Rapporti superiori, che indicano pertanto uno scostamento maggiore tra l'azione a 2475 anni e quella a 475, si osservano in Italia meridionale e in Calabria, ossia nelle zone a più elevato potenziale sismico, anche se non mancano eccezioni come in Italia settentrionale.

- 2) completeness achieved through temporal derivative of cumulated number of events;
- 3) values of parameter "b" (Gutenberg-Richter relation) obtained for each macrozone (Fig. 3) and then applied to each seismogenetic zone with the relevant seismicity rates;
- 4) maximum magnitude in each zone coinciding with the historically observed/estimated peak, regardless of the completeness period;
- 5) spectral parameters computed taking into account the random uncertainty of attenuation laws;
- 6) country divided into a computational grid with a side of 5 km.

For each magnitude class (Fig. 2), the completeness period begins with the peak value of the dN/dT function; however, such period should not be shorter than the one of the immediately higher magnitude class. The magnitude classes are those reported in the hazard study (INGV, 2004b) that Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia has recently conducted to meet the seismic zoning requirements laid down in Prime Minister's Decree 3274/2003.

The results (Fig. 3) show the distribution of the PGA with a 10% probability of exceedance in 50 years (return period of 475 years). The figure suggests that the 0.35g value, specified in the Regulations for class 1, is exceeded for some zones of southern and central Italy.

The different seismicity of the country is also testified by the ratio of the PGA values at 2% to those at 10% of probability of exceedance in 50 years. In Fig. 4, part of the Italian municipalities exhibit a ratio of around 1.5. Higher ratios (reflecting a more substantial deviation between the action with a return period of 2475 years and the one with 475 years) are observed in southern Italy and in particular in Calabria, i.e. in the zones with the highest seismic potential, and exceptionally in northern Italy.

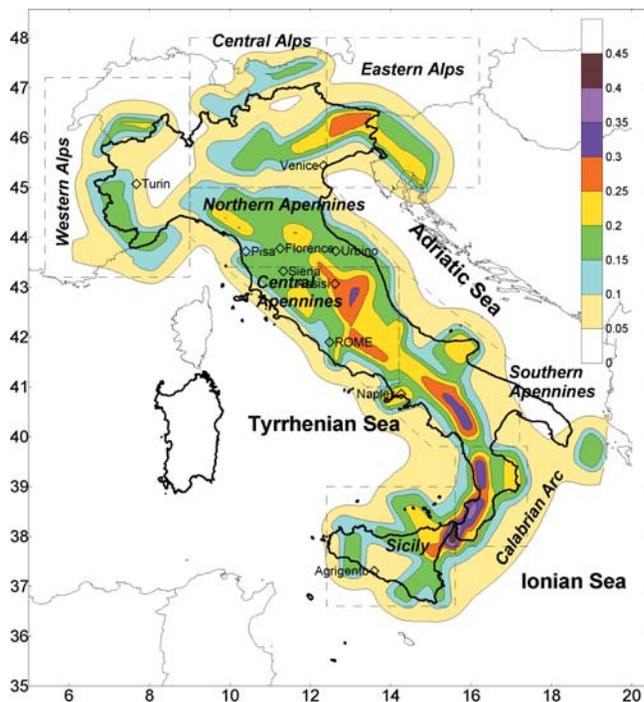


Fig. 3 - Distribuzione del PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni)
 - Distribution of PGA with 10% probability of exceedance in 50 years (return period of 475 years)

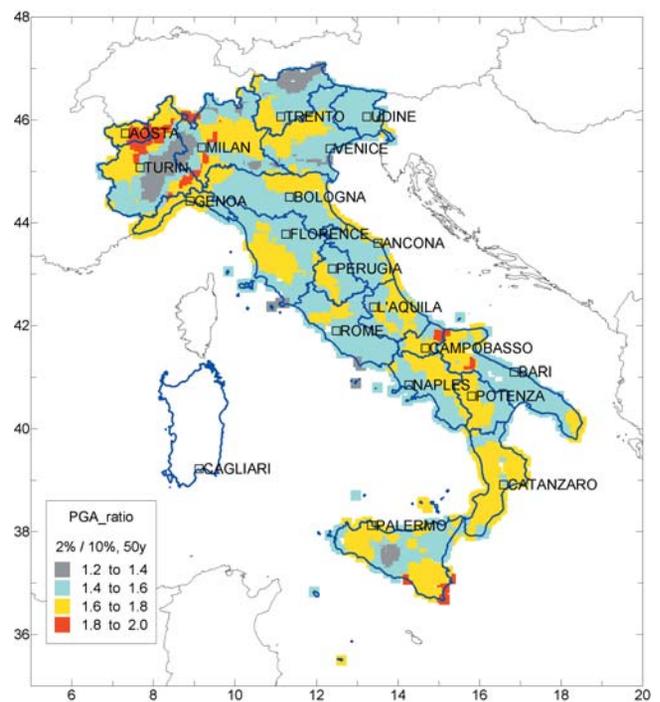


Fig. 4 - Rapporto tra i valori di PGA calcolati, rispettivamente, al 2% ed al 10% di eccedenza in 50 anni
 - Ratio between PGA values calculated at 2% and 10% probability of exceedance in 50 years

AZIONI DI RIFERIMENTO PER LO STATO LIMITE ULTIMO (SLU)

La forma spettrale di Norma, ancorata ad un valore di PGA avente tempo di ritorno di 475 anni, è stata confrontata con gli spettri a pericolosità uniforme calcolati per l'intero territorio nazionale, con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (tempo di ritorno 2475 anni) e poi scalati di un fattore 1,5.

Tale procedura, prevista anche dalle recenti norme sismiche statunitensi (ATC, 2000) è il frutto delle seguenti considerazioni:

- 1) la progettazione antisismica include un margine di sicurezza intrinseco di 1.5. In altre parole, una struttura antisismica è in grado di resistere, senza collassare, ad un'azione almeno pari a 1.5 volte quella di progetto.
- 2) il progetto delle strutture è condotto secondo il criterio della "massima azione considerabile" (LEYENDEKER *et alii*, 2000): ossia quell'azione compatibile con i massimi terremoti rilasciabili nell'area considerata;
- 3) in Italia i terremoti più forti rilasciabili dalle zone a maggiore potenziale sismico hanno tempi di ritorno ultramillenari. Una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni, corrispondente a un tempo di ritorno di 2475 anni, può quindi ritenersi significativa della massima azione considerabile.

REFERENCE ACTIONS FOR THE ULTIMATE LIMIT STATE (ULS)

The spectral shape specified in the Regulations is associated with a PGA having a return period of 475 years. This shape was compared with the uniform hazard spectra calculated for the whole country, with a 2% probability of exceedance in 50 years (return period of 2475 years), and then scaled down by a factor of 1.5.

This procedure, which is also covered by the recent US seismic standards (ATC, 2000) arises from the following considerations:

- 1) the design of structures for seismic resistance incorporates an intrinsic safety margin of 1.5. In other words, a seismic-resistant structure can withstand (without collapsing) an action equal to at least 1.5 times the design action;
- 2) the design of structures is based on the "maximum credible action" (LEYENDEKER *et alii*, 2000): i.e. the maximum earthquake which may occur in the investigated zone;
- 3) in Italy, the strongest earthquakes that may occur in the highest seismic-potential zones have ultramillenary return periods. Hence, a 2% probability of exceedance in 50 years (return period of 2475 years) may represent the maximum credible action.

The spectrum specified in the Regulations and the hazard spectra were compared on the basis of the following control parameters:

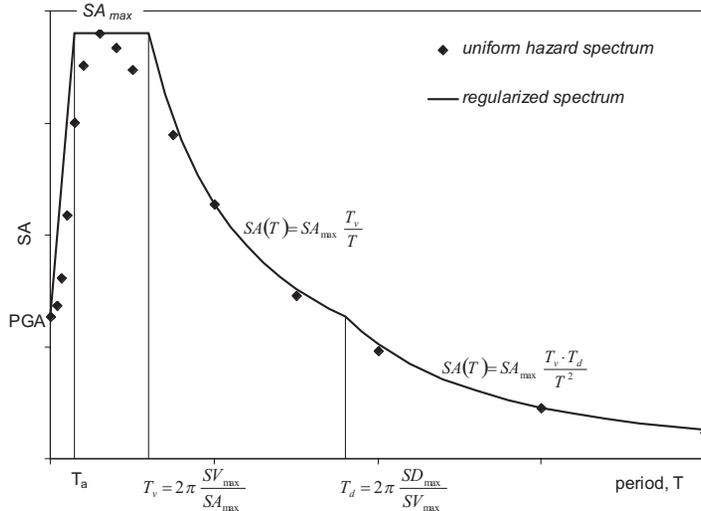
Il confronto tra lo spettro di Norma e gli spettri di pericolosità è stato eseguito adottando i seguenti parametri di controllo:

- " i valori dei periodi che delimitano i rami dello spettro;
- " il valore del plateau in accelerazione;
- " l'area sottesa dallo spettro, in un intervallo di periodi predefinito.

A tal fine lo spettro di pericolosità è stato semplificato e regolarizzato in modo tale da assumere una forma simile a quello di norma.

Per ottenere lo spettro regolarizzato è stata adottata la seguente metodologia, illustrata in figura 5, applicabile agli spettri calcolati per qualsiasi livello di pericolosità:

1. Per ciascuno spettro viene determinato il valore spettrale massimo in accelerazione, velocità e spostamento, indicati rispettivamente con SA_{max} , SV_{max} e SD_{max} , ricordando che è $SA=SV \cdot \omega=SD \cdot \omega^2$, essendo la frequenza angolare $\omega=2\pi/T$;
2. I massimi così determinati caratterizzano, nei rispettivi piani, tre rami spettrali definiti ad accelerazione, velocità e spostamento costanti;
3. I tre rami sono separati da due frequenze d'angolo, denominate, rispettivamente, ω_v e ω_d tali per cui risultano soddisfatte le uguaglianze $SA_{max} = \omega_v \cdot SV_{max}$ e $SV_{max} = \omega_d \cdot SD_{max}$. I periodi che individuano l'inizio dei rami ad accelerazione, velocità e spostamento costanti sono indicati con T_a , T_v e T_d , rispettivamente;
4. I due rami in velocità e spostamento variano con il periodo come T^{-1} e T^{-2} , rispettivamente;
5. Il ramo compreso fra $T=0$ e $T=T_a$ è ottenuto, in prima approssimazione, per linearizzazione dello spettro tra il valore di PGA e SA_{max} .



- " values of the periods bounding the spectrum branches;
- " value of the acceleration plateau;
- " zone subtended by the spectrum in a predetermined interval of periods.

For this purpose, the hazard spectrum was simplified and regularised so as to take on a shape similar to the regulatory one.

The following approach was adopted for regularising the spectrum. The approach (Fig. 5) is applicable to the spectra computed for any hazard level:

1. For each spectrum, the spectral acceleration, velocity and displacement peaks (denoted with SA_{max} , SV_{max} and SD_{max} , respectively) are calculated, bearing in mind that $SA=SV \cdot \omega=SD \cdot \omega^2$, since the angular frequency is $\omega=2\pi p/T$;
2. In the respective planes, the so determined peaks characterise the three spectral branches which are defined to have constant acceleration, velocity and displacement;
3. The three branches are separated by two angle frequencies (denoted with ω_v and ω_d , respectively), which satisfy the equalities $SA_{max} = \omega_v \cdot SV_{max}$ and $SV_{max} = \omega_d \cdot SD_{max}$. The periods identifying the beginning of the constant acceleration, velocity and displacement branches are called T_a , T_v and T_d , respectively;
4. The two velocity and displacement branches vary with the period into T^{-1} and T^{-2} , respectively;
5. The branch between $T=0$ and $T=T_a$ is obtained, to a first approximation, by linearising the spectrum between the PGA and SA_{max} values.

Fig. 5 - Regularizzazione dello spettro di pericolosità uniforme
- Regularisation of the uniform hazard spectrum

AZIONE SISMICA ORIZZONTALE

Dall'esame degli spettri di pericolosità regolarizzati si osserva quanto segue:

- 1) il ramo a spostamento costante ($T>T_d$) inizia sempre per periodi T 1s (figura 6) pur senza arrivare mai ai 2s suggeriti dalla

HORIZONTAL SEISMIC ACTION

The regularised hazard spectra show that:

- 1) the constant displacement branch ($T>T_d$) always begins at periods T 1s (Fig. 6), without reaching, however, the 2s value suggested by the Regulations. The highest values

Norma. I valori più elevati, sempre inferiori a 2s, si riscontrano nelle aree poste nella zona Sud della penisola italiana, ossia nelle zone a più elevato potenziale sismico;

2) la medesima osservazione si può ricavare dall'esame dalla figura 7 per il ramo a velocità costante. T_v aumenta procedendo verso il Mezzogiorno d'Italia, con valori anche superiori allo 0.4s della Norma. Viceversa, le zone a minore potenziale sismico (Italia nord-occidentale) presentano valori di T_v inferiori a quello di Norma;

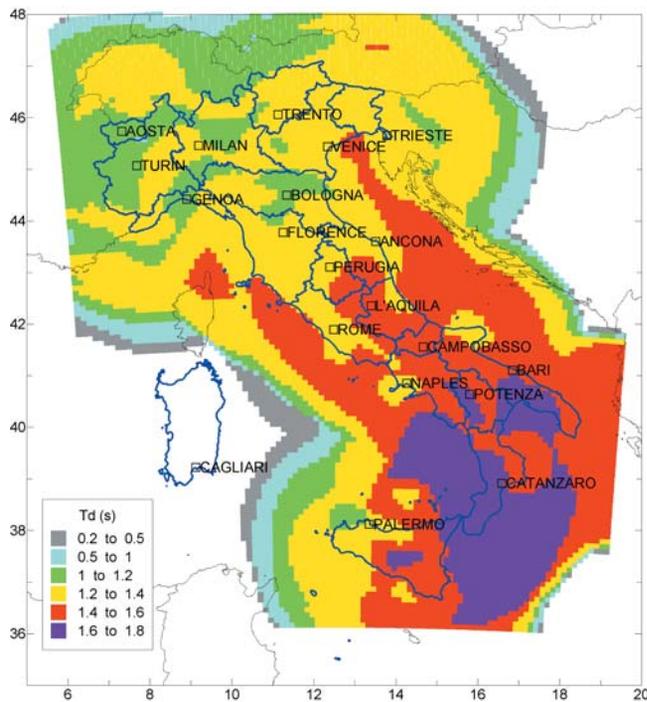


Fig. 6 - Distribuzione del periodo T_d sul territorio nazionale
- Distribution of period T_d over the country

3) il valore di T_a , periodo d'inizio del ramo in accelerazione costante, è compreso a sua volta nel range tra 0.15s e 0.2s con una prevalenza tra 0.16s e 0.17s (figura 8); pertanto il valore di 0.15s suggerito dalla Norma si dimostra essere ragionevolmente cautelativo.

Un aumento relativo di SA_{max} maggiore di SV_{max} comporta uno spostamento di T_v verso periodi più bassi; pertanto, fissato un valore di T_a , l'aumento di SA_{max} conduce ad un plateau in accelerazione più stretto, ossia verso una forma spettrale più aguzza. Questo effetto è ben visibile in figura 9, che illustra la differenza tra i valori di T_v e T_a calcolati (fissato dalla Norma costante e pari a 0.25s). Dalla figura si osserva infatti che il plateau ad accelerazione costante risulta più stretto (<0.25s), nelle aree a sismicità medio-bassa, e più ampio (> 0.25s) in quelle a sismicità più alta.

Per quanto riguarda il rapporto SA_{max}/PGA , che la Norma fissa in 2.5, dalla figura 10 si osserva come quello calcolato sia sempre superiore a 2.7, avvicinandosi al rapporto previsto dalla Norma solo nelle

(always below 2s) are recorded in the zones of southern Italy, i.e. the ones with the highest seismic potential;

2) the same observation applies to the constant velocity branch in Fig. 7. T_v increases when proceeding towards southern Italy and occasionally exceeds the 0.4s value specified in the Regulations. By contrast, the T_v values of lower seismic-potential zones (north-western Italy) lie below the regulatory value;

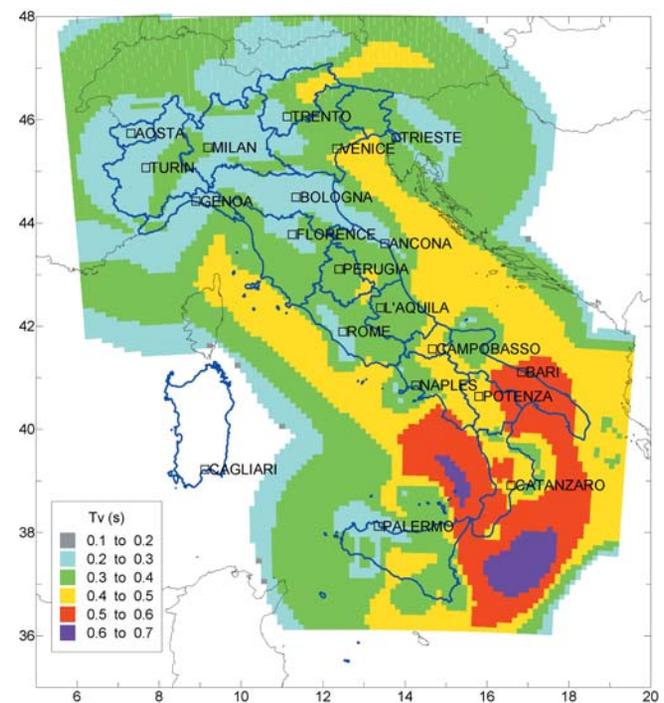


Fig. 7 - Distribuzione del periodo T_v sul territorio nazionale
- Distribution of period T_v over the country

3) in turn, the value of T_a (period of beginning of the constant acceleration branch) ranges between 0.15s and 0.2s and, predominantly, between 0.16s and 0.17s (Fig. 8); thus, the regulatory value of 0.15s proves to be reasonably conservative.

A relative increase of SA_{max} exceeding SV_{max} shifts T_v towards lower periods. Thus, having set the value of T_a , the increase of SA_{max} results into a narrower acceleration plateau, i.e. into a more pointed spectral shape. This effect is well discernible in Fig.9, showing the difference between the calculated T_v and T_a values (under the Regulations, the plateau should have a constant value of 0.25s). Indeed, in the Figure, the acceleration plateau is narrower (<0.25s) in medium-low seismicity zones and wider (> 0.25s) in higher seismicity ones.

Moreover, as shown in Fig. 10, the calculated SA_{max}/PGA ratio (2.5 under the Regulations) always lies above 2.7, thus approaching the regulatory value only in zones of higher seismic potential. The

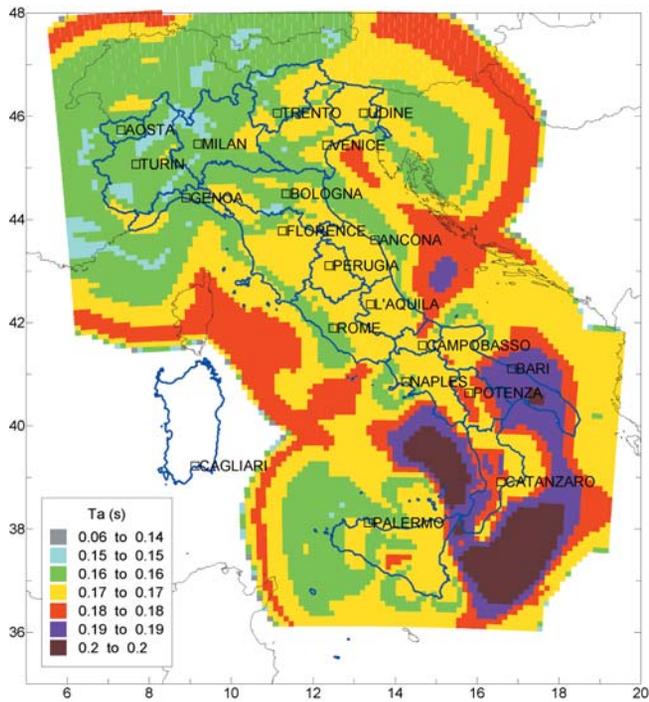


Fig. 8 - Distribuzione del periodo T_a sul territorio nazionale
 - *Distribution of period T_a over the country*

zone a più elevato potenziale sismico. Tale differenza è determinata dalla scelta della Norma, allineata a normative internazionali tarate su livelli di sismicità più alti di quelli Italiani, di adottare forme spet-

difference is due to the fact that the Regulations are based on international standards whose levels of seismicity are higher than the Italian ones. Consequently, the spectral shapes specified in the

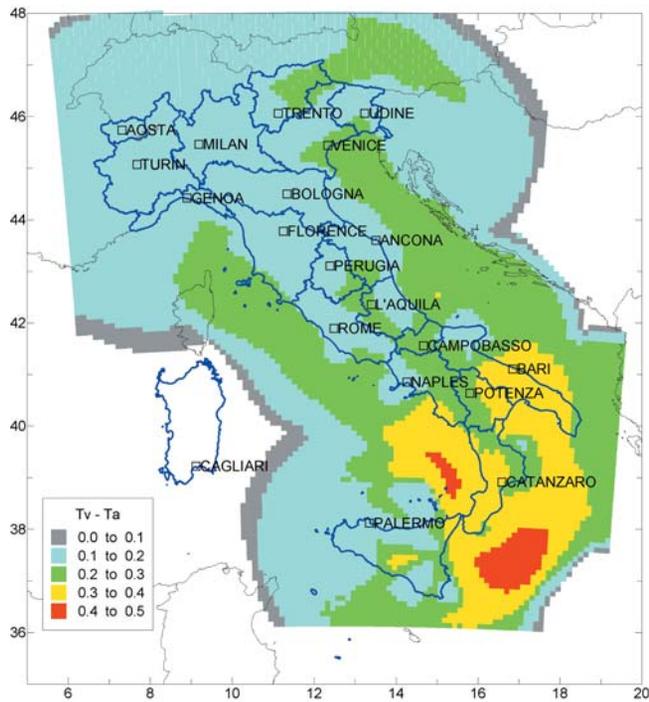


Fig. 9 - Distribuzione dell'ampiezza dell'intervallo (T_v-T_a) sul territorio nazionale
 - *Distribution of the (T_v-T_a) interval amplitude over the country*

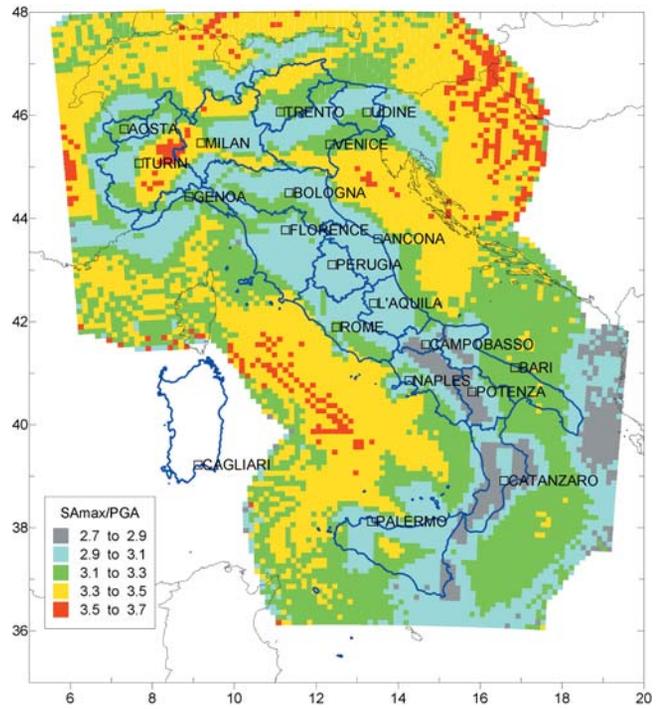


Fig. 10 - Distribuzione del rapporto SA_{max}/PGA sul territorio nazionale
 - *Distribution of the SA_{max}/PGA ratio over the country*

trali non aderenti alla reale pericolosità del territorio italiano, specialmente nelle aree a medio-bassa sismicità.

Per quantificare l'effetto dell'applicazione dei criteri di Norma sull'entità delle azioni sismiche imposte ai comuni Italiani, si sono confrontate - per ciascun comune - le aree sottese dagli spettri in accelerazione nel range di periodi 0,2s-1,0s, che rappresenta l'intervallo di periodi di interesse ingegneristico. Per ogni comune, in pratica, è stato calcolato il rapporto:

$$\Delta I_{SA}(\%) = \frac{I_{SA} - I_{SA}(norma)}{I_{SA}(norma)} \cdot 100 \quad (1)$$

essendo I_{SA} l'area dello spettro regolarizzato, ossia:

$$I_{SA} = \int_{0,2}^1 SA(T, \xi) dT \quad (2)$$

$I_{SA}(norma)$ è stata calcolata dallo spettro definito dalla Norma per le quattro zone sismiche in cui viene convenzionalmente suddiviso il territorio. Per attribuire a ciascun comune la pertinente zona sismica è stato applicato il criterio di classificazione basato sul valore del parametro PGA; quest'ultimo è ottenuto dalla pericolosità sismica realizzata per il presente studio.

Le figure 11 e 12 mostrano, rispettivamente, la zonazione come testè derivante e la distribuzione spaziale dei valori assunti dal rapporto I_{SA} . La figura 12 mostra valori negativi

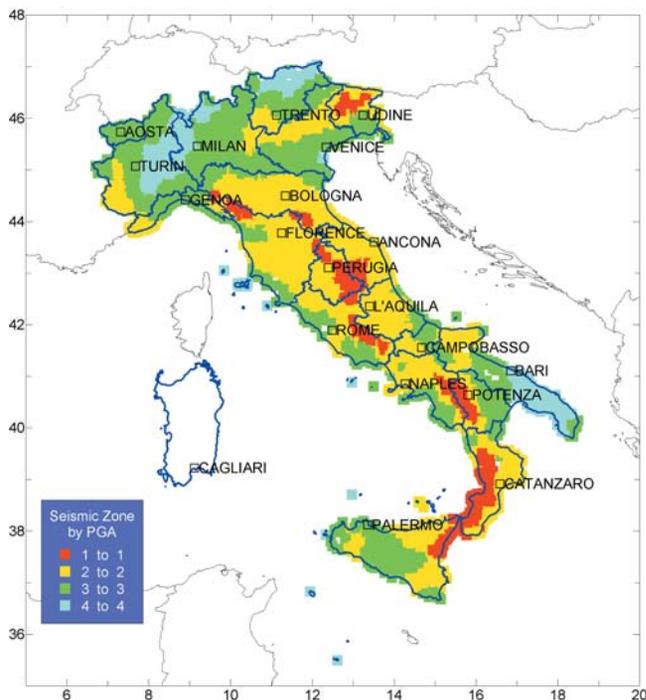


Fig. 11 - Zonazione sismica del territorio nazionale calcolata sulla base del valore di PGA riportato in figura 3 conformemente ai criteri stabiliti dalle norme vigenti
- Seismic zoning based on the PGA value shown in Fig. 3, in accordance with the regulatory criteria

Regulations do not reflect the actual hazard of the country and, in particular, the one of medium-low seismicity zones.

The study investigated the effect that the regulatory criteria might have on the extent of the seismic actions assigned to Italian municipalities. Such effect was quantified in each municipality by comparing the zones subtended by the acceleration spectra in the 0.2s-1s range of periods, i.e. the range of engineering interest. In practice, for each municipality, the following ratio was determined:

$$\Delta I_{SA}(\%) = \frac{I_{SA} - I_{SA}(norma)}{I_{SA}(norma)} \cdot 100 \quad (1)$$

I_{SA} being the surface area of the regularised spectrum, that is :

$$I_{SA} = \int_{0,2}^1 SA(T, \xi) dT \quad (2)$$

$I_{SA}(regulatory)$ was computed from the spectrum defined by the Regulations for the four seismic zones into which the country is conventionally divided. To assign the relevant seismic zone to each municipality, use was made of the classification criterion based on the PGA parameter value; the latter value was obtained from the seismic hazard assumed in this study.

Figs. 11 and 12 display the resulting zoning, as well as the spatial distribution of the values of the I_{SA} ratio. Fig. 12 shows negative values (overestimated regulatory value) in central-

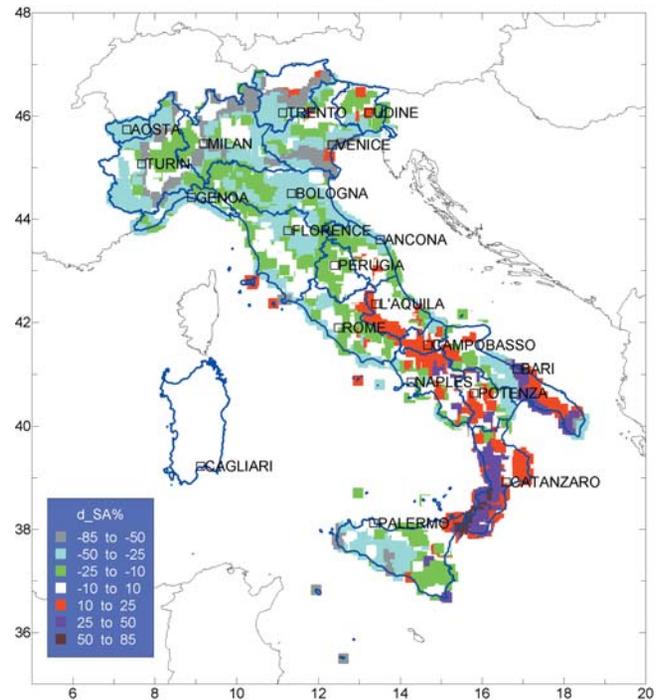


Fig. 12 - Distribuzione del rapporto ΔI_{SA} (%) sul territorio nazionale
- Distribution of the ΔI_{SA} ratio (%) over the country

(sovrastima della norma) al centro-nord e positivi (sottostima della norma) lungo la catena appenninica meridionale, con particolare riferimento alla regione Calabria.

Adottando spettri di pericolosità regolarizzati, le azioni sismiche aumentano rispetto a quelle di Norma per le zone ad alta sismicità, in particolare per la prima zona seppure in maniera moderata (figura 13a). Viceversa, esse si riducono nelle zone a sismicità medio-bassa (in particolare per le zone 2 e 3), con un saldo a tutto vantaggio della riduzione dato il numero preponderante di comuni classificati nelle zone a sismicità più bassa.

Ancora più importante appare il dato relativo alla popolazione interessata (figura 13b). La riduzione dell'azione sismica riguarda circa 30 milioni (più della metà della popolazione totale); al contrario quella interessata da un aumento è di circa 6 milioni, ed è concentrata in particolare nella zona a più alta sismicità (zona 1). Ciò evidenzia che le azioni di Norma, sebbene rappresentative di azioni tipiche di ambienti sismotettonici di alta sismicità, non garantiscono un adeguato livello di protezione proprio laddove questo sarebbe più richiesto.

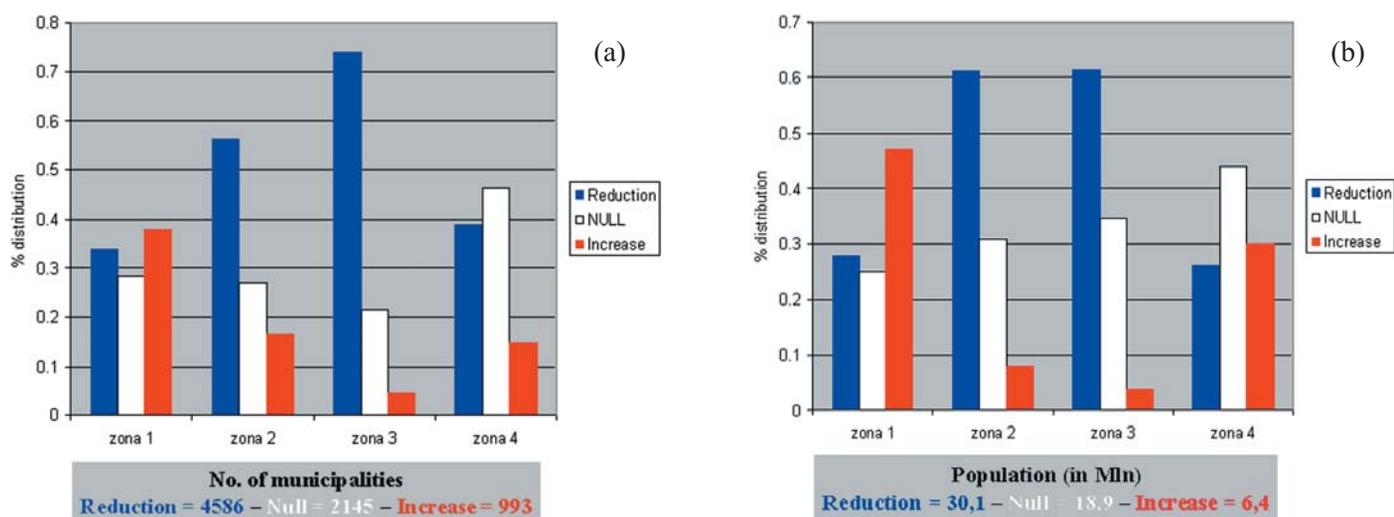


Fig. 13 - Variazione dell'azione sismica in funzione dei comuni (a) e della popolazione (b) adottando il criterio di zonazione proposto nel presente lavoro rispetto a quello definito dalle norme vigenti

- Variation of seismic action depending on municipalities (a) and on population (b), by adopting the zoning criterion proposed in this study vs. the regulatory one

AZIONE SISMICA VERTICALE

L'azione sismica verticale è stata investigata in termini di rapporto con la componente orizzontale (H/V) al fine di stabilire una eventuale relazione tra le due componenti a parità di probabilità di occorrenza.

I risultati, sempre riferiti agli spettri regolarizzati, sono riassunti nelle considerazioni che seguono:

1) I rapporti in PGA e SA_{max} diminuiscono nelle aree a maggior potenziale sismico (attestandosi intorno a 2), a testimonianza del fatto che laddove le magnitudo massime sono maggiori tende a diven-

northern Italy and positive ones (underestimated regulatory value) along the southern Apennine range, especially in the Calabria region.

By adopting regularised hazard spectra, seismic actions increase (vs. regulatory ones) in high seismicity zones, especially in the first zone, albeit to a moderate extent (Fig. 13a). Conversely, seismic actions decrease in medium-low seismicity zones (especially 2 and 3) with an overall decreasing effect, as the municipalities classified into lower seismicity zones are dominant.

Even more important is this effect on the population involved (Fig. 13b). The decrease of the seismic action affects about 30 million people (more than half of the total population). By contrast, the people involved by an increase in the seismic action are about 6 million and are particularly concentrated in the highest seismicity zone (zone 1). Hence, although the Regulations refer to actions that are typical of seismo-tectonic environments with high seismicity, they do not guarantee an adequate level of protection where it would be more needed.

VERTICAL SEISMIC ACTION

The vertical seismic action was investigated in terms of ratio to the horizontal component (H/V), so as to establish a possible relationship between the two components, probability of occurrence remaining equal.

The results (with reference to regularised spectra) are summarized below:

1) The ratios in PGA and SA_{max} decline in zones with higher seismic potential (reaching a value of about 2), evidencing that the higher the peak magnitudes, the more significant is the contribution of the vertical component of motion.

tare sempre più rilevante il contributo della componente verticale del moto.

2) Il rapporto $H/V=2$ risulta in pratica soddisfatto solo per le basse frequenze (rapporto in SD_{max}); in ogni caso non si ha mai una sostanziale equivalenza tra le due componenti come invece prescrive la Norma, equivalenza che risulterebbe soddisfatta solo per eventi di eccezionale contenuto energetico, poco compatibili con la sismicità Italiana.

3) Il rapporto H/V è massimo nel ramo in velocità e minimo in quello in accelerazione e spostamento. Ciò comporta, in base alla metodologia di regolarizzazione degli spettri proposta, che l'azione verticale è caratterizzata da valori inferiori di T_v e valori superiori di T_d rispetto all'azione orizzontale, con il risultato di un ampliamento del ramo a velocità costante.

AZIONI DI RIFERIMENTO PER LO STATO LIMITE DI DANNO (SLD)

Per verificare la tenuta della forma spettrale dello SLU di Norma anche per lo SLD - che viene assunta dall'Ordinanza 3274/03 di uguale forma ma scalata di 2.5 - sono stati utilizzati gli spettri a pericolosità uniforme calcolati al 50% di probabilità di eccedenza in 50 anni (corrispondente a un periodo di ritorno di 72 anni), così come suggerito dall'ATC. Si segnala al riguardo che il medesimo periodo di ritorno è assunto rappresentativo delle azioni di riferimento per ancorare lo spettro dello SLD dal T.U., mentre l'EC8 prevede un'azione calcolata su una probabilità di eccedenza del 10% in 10 anni (corrispondente ad un periodo di ritorno di 95 anni).

Regolarizzando gli spettri con la metodologia sopra illustrata si osserva che i valori di T_a e T_v si concentrano rispettivamente a 0,15s e 0,3s; T_d invece si pone in un range di periodi compreso tra 1s e 1,4s. Inoltre, il rapporto tra le azioni a 475 anni e 72 anni mostra che in termini di SA_{max} assume valori intorno a 2 e diminuisce nelle aree a più bassa sismicità; analogamente il rapporto in SV_{max} si pone intorno a 2.5 e aumenta nelle aree a maggior potenziale sismico. Le intensità spettrali nei rami ad accelerazione e velocità costanti hanno a loro volta un rapporto intorno a 3 che cresce all'aumentare della sismicità. Infine, oltre il 60% dei comuni ha un rapporto in PGA inferiore a 2.

Pertanto, il passaggio ad azioni a minor tempo di ritorno comporta necessariamente una diversa forma spettrale, che si traduce, nella fattispecie, in un plateau in accelerazione costante più stretto ma con una differenza maggiore rispetto alle accelerazioni spettrali del ramo in velocità; il risultato è uno spettro per lo SLD più aguzzo che per lo SLU, che si avvicina, per certi versi, allo spettro type-II dell'EC8 (bassa sismicità, $M_s < 5.5$). Inoltre, adottare un fattore di scala univoco per tutto il territorio italiano per passare dallo SLU allo SLD implica una non idonea rappresentazione delle caratteristiche sismiche nazionali. Tale fattore dovrebbe infatti aumentare le differenze tra le azioni nelle aree a maggiore sismicità e diminuirle in quelle a minore severità. Si noti, infine, che il rapporto 2.5 è comun-

2) The $H/V=2$ ratio is practically satisfied only at low frequencies (ratio in SD_{max}); at any rate, the two components are never equivalent, contrary to what is specified in the Regulations; the regulatory equivalence might be satisfied only for exceptional events, which are poorly likely in Italian seismic zones.

3) The H/V ratio is maximum in the velocity branch and minimum in the acceleration and displacement ones. Based on the proposed regularised spectrum approach, this finding implies that the vertical action has lower T_v values and higher T_d values with respect to the horizontal action, thereby widening the constant velocity branch.

REFERENCE ACTIONS FOR THE DAMAGE LIMITATION STATE (DLS)

The study also determined whether the regulatory spectral shape for the ULS was adequate also for the DLS under Prime Minister's Decree 3274/03, the spectral shape should be identical but scaled down by a factor of 2.5. For such determination, the uniform hazard spectra were computed at 50% of probability of exceedance in 50 years (corresponding to a return period of 72 years), as suggested by ATC. It is worth pointing out that, in the Consolidated Text of Technical Rules, the same return period is taken to be representative of the reference actions to be associated with the DLS spectrum. Conversely, EC8 refers to an action calculated on 10% probability of exceedance in 10 years (return period of 95 years).

By regularising the spectra through the above-described approach, the T_a and T_v values prove to be concentrated at 0.15s and 0.3s, respectively. Instead, T_d falls within the 1s-1.4s range of periods. Additionally, in terms of SA_{max} , the ratio of actions with a return period of 475 years to those with a return period of 72 years acquires a value of around 2 and decreases in lower seismicity zones. Likewise, in SV_{max} , such ratio is around 2.5 and increases in zones with higher seismic potential. In turn, the spectral intensities in the constant velocity and acceleration branches have a ratio of about 3, which grows with seismicity. Finally, over 60% of the municipalities have a ratio of less than 2 in PGA.

Consequently, the passage to actions with a shorter return period requires a different spectral shape. In the case under review, such shape translates into a constant acceleration plateau that is narrower but with a more significant difference with respect to the spectral accelerations of the velocity branch. The resulting DLS spectrum has a more pointed shape than the ULS one and, in some respects, it is close to the EC8 type-II spectrum (low seismicity, $M_s < 5.5$). Furthermore, using a single scale factor when passing from the ULS to the DLS for the whole country generates an inadequate representation of national seismic characteristics. Indeed, this factor should increase the differences between actions in higher seismicity zones and decrease them in lower seismicity ones. Finally, it is worth noting

que compatibile con azioni sismiche riferibili a probabilità di eccedenza più alte del 50% in 50 anni, ossia a tempi di ritorno più brevi di 72 anni.

CONCLUSIONI

Sono state analizzate le azioni sismiche previste dalla Norma (Ordinanza PCM 3274/03 e dal Testo Unico, 2005) relativamente ai due stati limite di danno (SLD) e collasso (SLU) e alle due componenti del moto, orizzontale e verticale. L'analisi, effettuata sulla base di uno studio aggiornato di pericolosità sismica, ha evidenziato che l'azione di Norma non è sempre compatibile con i caratteri di sismicità del territorio italiano.

Ciò ha portato a formulare un diverso approccio, sia alla "zonazione" *latu sensu* del territorio nazionale sia all'attribuzione delle rispettive azioni, basato su seguenti criteri:

1. lo spettro elastico in accelerazione, definito nell'intervallo di periodi 0-4, è il parametro descrittore della pericolosità;
2. le azioni sismiche per i due stati limite sono ricavate dalla regolarizzazione degli spettri a pericolosità uniforme frutto di specifiche analisi;
3. il livello di pericolosità da considerare deve essere rappresentativo dello stato limite di verifica analizzato;
4. l'adozione di due livelli di pericolosità differenziati per lo SLU e lo SLD.

Le principali implicazioni di tali scelte sono:

1. sparisce ogni riferimento a classi o zone sismiche le quali, accorpando più comuni caratterizzati ciascuno da un diverso livello di pericolosità, non permettono di rendere omogeneo il livello di protezione prescelto;
2. ogni comune ha la propria azione sismica di riferimento per lo SLU e per SLD e, pertanto, il livello di protezione è il medesimo in tutti i comuni, eliminando con ciò le discrepanze evidenziate in figura 13: a titolo esemplificativo si riportano, nelle figure 14 e 15, gli spettri di norma e regolarizzati di due comuni dell'Italia meridionale e settentrionale, rispettivamente;

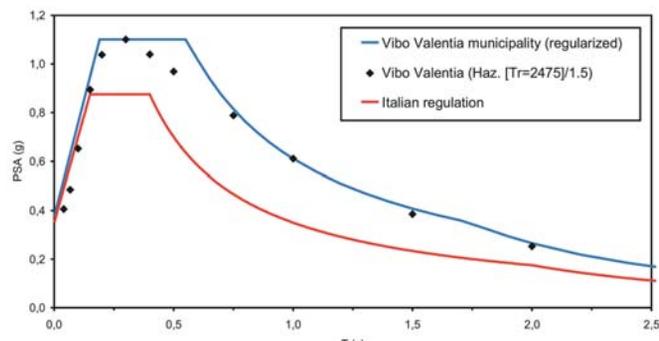


Fig. 14 - Spettro regolarizzato per il comune di Vibo Valentia (Italia meridionale) e confronto con lo spettro di norma

- Regularized spectrum of the Vibo Valentia municipality (Southern Italy) compared with the Italian regulation spectrum

that the 2.5 ratio is however consistent with seismic actions having a 50% higher probability of exceedance in 50 years, i.e. return periods that are than 72 years shorter.

CONCLUSIONS

The study analysed the seismic actions specified in the Regulations (Prime Minister's Decree 3274/03 and Consolidated Text of Technical Rules, 2005) in terms of the Damage Limit State (DLS) and of the collapse state (ULS) and of the two horizontal and vertical components of motion. The analysis, which was relied on an up-to-date seismic hazard assessment, indicated that the regulatory actions are not always consistent with the country's seismic characteristics.

This finding led to the development of a different approach to national "zoning" (*latu sensu*) and to the assignment of the respective actions in accordance with the following criteria:

1. the elastic acceleration spectrum, defined between period T interval 0-4 seconds, is the hazard descriptor;
2. seismic actions for the two limit states are obtained by regularising the uniform hazard spectra resulting from specific analyses;
3. the hazard level to be considered should be representative of the verification limit state analysed;
4. the choice of two different hazard levels, one for the ULS and one for the DLS, rather than a single one for both limit states.

The main implications of the above choices are as follows:

1. no reference is made to seismic classes or zones; indeed, by grouping multiple municipalities (each with a different hazard level) into a single class or zone, the selected level of protection would not be homogeneous;
2. each municipality has its own reference seismic action for the ULS and for the DLS; consequently, the level of protection is identical in all municipalities, thereby eliminating the discrepancies shown in Fig. 13; by way of example, Figs. 14 and 15 display the regulatory spectra and the regularised spectra of two municipalities in southern and northern Italy, respectively;
3. the regularised response spectrum, obtained for each municipality, adequately reflects the hazard levels throughout the

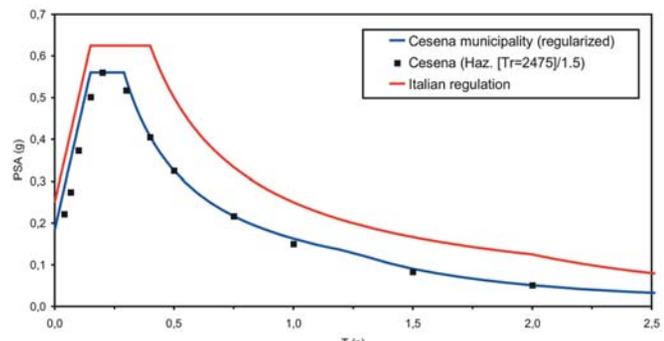


Fig. 15 - Spettro regolarizzato per il comune di Cesena (Italia centro-settentrionale) e confronto con lo spettro di norma

- Regularized spectrum of the Cesena municipality (Central-Northern Italy) compared with the Italian regulation spectrum

3. lo spettro di risposta regolarizzato, derivato per ciascun comune, riproduce adeguatamente i livelli di pericolosità in tutto il range di periodi T di interesse ingegneristico;

4. le azioni sismiche per lo SLU e lo SLD sono differenziate in funzione del tempo di ritorno delle azioni e, quindi, della frequenza di accadimento; questo fa sì che la forma spettrale sia diversa per i due Stati Limite, come è logico aspettarsi da azioni di bassa intensità ma frequenti rispetto ad azioni intense, ma rare.

Le probabilità di occorrenza prese a riferimento per le verifiche degli Stati Limite sono le seguenti:

A) 2% di probabilità di eccedenza in 50 anni (tempo di ritorno equivalente=2475 anni) per lo SLU;

B) 50% di probabilità di eccedenza in 50 anni (tempo di ritorno equivalente=72 anni) per lo SLD.

Per lo SLU le azioni calcolate al livello di pericolosità sopra definito vengono moltiplicate per 2/3 per tenere conto di un margine di sicurezza intrinseco nella progettazione sismica pari a 1.5.

Infine, lo spettro elastico in accelerazione che definisce l'azione sismica per ciascun comune, per ciascun stato limite, per ciascuna condizione di sito e per ciascuna componente del moto, si ricava applicando le seguenti espressioni:

$$0 = T < Ta \quad SA(T) = (SA_{max} - PGA) \frac{T}{T_a} + PGA$$

$$Ta = T < Tv \quad SA(T) = SA_{max}$$

$$Tv = T < Td \quad SA(T) = SA_{max} (Tv/T)$$

$$Td = T \quad SA(T) = SA_{max} \frac{T_v \cdot T_d}{T^2}$$

dove $Tv = 2\pi SV_{max}/SA_{max}$, $Td = 2\pi SD_{max}/SV_{max}$ mentre Ta è ottenuto per minimizzazione del periodo che rende il ramo lineare tra PGA e SA_{max} e sempre involupante i punti dello spettro di pericolosità.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano il prof. Franco Braga, Presidente dell'Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica (ANIDIS) per gli utili suggerimenti.

range of T periods of engineering interest;

4. seismic actions for ULS and DLS are different, depending on their return periods and thus on their frequencies of occurrence; as a result, the spectral shape is different for the two Limit States, as should be obviously expected from low-intensity but frequent actions vs. intense but rare actions.

The probabilities of occurrence, used as a reference for the verification of the Limit States, are as follows:

A) 2% probability of exceedance in 50 years (equivalent return period=2475 years) for the ULS;

B) 50% probability of exceedance in 50 years (equivalent return period=72 years) for the DLS.

For the ULS, the actions calculated at the above-defined hazard level are multiplied by 2/3 to account for a 1.5 intrinsic safety margin in seismic design.

Finally, the elastic acceleration spectrum defining the seismic action for each municipality, for each limit state, for each site condition and for each component of motion is computed by applying the following expressions:

$$0 = T < Ta$$

$$Ta = T < Tv \quad SA(T) = (SA_{max} - PGA) \frac{T}{T_a} + PGA$$

$$SA(T) = SA_{max}$$

$$Tv = T < Td \quad SA(T) = SA_{max} (Tv/T)$$

$$Td = T \quad SA(T) = SA_{max} \frac{T_v \cdot T_d}{T^2}$$

where

$Tv = 2\pi SV_{max}/SA_{max}$, $Td = 2\pi SD_{max}/SV_{max}$, whilst Ta is derived by minimising the period which linearises the branch between PGA and SA_{max} and which always envelopes the points of the hazard spectrum.

ACKNOWLEDGEMENT

The Authors are grateful to Prof. Franco Braga, President of the Italian National Association of Seismic Engineering (ANIDIS) for helpful comments.

OPERE CITATE / REFERENCES

- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC) (2000) - *NEHRP Recommended provisions for Seismic Regulations for new Buildings and other Structures*. Federal Emergency Management Agency, FEMA 368/369, Washington, DC.
- SEI/ASCE 7-02 (2002) - *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineering. Reston - Virginia (USA)
- Building Seismic Safety Council (BSSC), 2001, 2000 Edition NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part I (Provisions, 368) and Part 2 (Commentary, 369), Washington, DC.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2002) - *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. prEN 1998-1, CEN/TC250/SC8/N317.
- CORNELL, C.A. (1968) - *Engineering seismic risk analysis*. Bull. Seism. Soc. of Am. **58**: 1583-1606.
- DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA N. 380/2001 - *Testo Unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia di edilizia*. G.U. n. 245 del 20 ottobre 2001, S.O. n. 239/L.
- ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA (INGV) (2004a) - *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)*. INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>
- ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA INGV (2004b). *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003 - Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile*. INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp.+5 appendici.
- LEYENDECKER, E.V., HUNT, R.J., FRANKEL, A.D. AND RUKSTALES, K.S. (2000) - *Development of Maximum Considered Earthquake Ground Motion Maps*. Earthquake Spectra, **16(1)**, 21-40.
- MELETTI C, PATACCA E, SCANDONE P. (2000) - *Construction of a seismotectonic model: the case of Italy*. Pure and Applied Geophysics 2000; 157: 11-35.
- ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI N. 3274/2003 - *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.*, G.U. n. 105 dell'8 maggio 2003, S.O. n. 72.
- ROMEO, R.W. & PUGLIESE, A. (2000) - *Seismicity, seismotectonics and seismic hazard of Italy*, Engineering Geology, **55**, 241-266.
- SABETTA F, PUGLIESE A. (1996) - *Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions*. Bulletin Seismological Society of America: **86(2)**: 337-352.