

REPUBBLICA ITALIANA



Regione Emilia-Romagna

BOLLETTINO UFFICIALE

DIREZIONE E REDAZIONE PRESSO LA PRESIDENZA DELLA REGIONE - VIALE ALDO MORO 52 - BOLOGNA

Parte seconda - N. 117

Anno 50

6 maggio 2019

N. 143

DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 APRILE 2019, N. 630

Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)

REGIONE EMILIA-ROMAGNA

DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 APRILE 2019, N. 630

Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)

LA GIUNTA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Premesso che:

- la legislazione della Regione Emilia-Romagna (da qui in avanti Regione) già con la L.R. n. 47/1978 "Tutela e uso del suolo" richiedeva che gli strumenti urbanistici fossero supportati da studi di sostenibilità geologica e nei comuni classificati sismici anche da analisi della pericolosità sismica locale (v. circolare 1288/1983);
- già con L. 64/1974 era richiesto che le costruzioni in zona sismica fossero progettate e realizzate considerando l'azione sismica attesa;
- secondo la vigente classificazione sismica del territorio nazionale, di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, tutti i Comuni sono classificati sismici secondo 4 classi a pericolosità sismica decrescente (classe 1: zona a pericolosità sismica elevata; classe 4: zona a minima pericolosità) e che i Comuni dell'Emilia-Romagna sono classificati in zona 2 e zona 3 (pericolosità sismica media e medio-bassa);
- le vigenti "Norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2018, D.M. 17/1/2018) richiedono il calcolo dell'azione sismica per la progettazione delle costruzioni sulla base della pericolosità sismica del sito d'interesse, considerate le locali condizioni geologiche e morfologiche;
- la microzonazione sismica (MS), cioè la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni in caso di terremoto, è uno degli strumenti più efficaci per la riduzione del rischio sismico in quanto permette, fino dalle prime fasi della pianificazione urbanistica, di valutare la pericolosità sismica nelle aree urbane e urbanizzabili, indirizzare i nuovi interventi verso zone a minore pericolosità e programmare interventi di mitigazione del rischio nelle zone in cui sono presenti particolari criticità;
- la L.R. n. 24/2017 "Disciplina regionale sulla tutela e uso del territorio" e la L.R. 19/2008 "Norme per la riduzione del rischio sismico" richiedono l'esecuzione di studi di microzonazione sismica per la redazione e l'approvazione dei piani urbanistici comunali e che le scelte urbanistiche e gli interventi sul territorio siano compatibili con la pericolosità sismica locale;
- la Regione con deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112/2007 ha approvato l'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. n. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a gli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", successivamente aggiornato con propria deliberazione n. 2193/2015;
- in data 13 novembre 2008 sono stati approvati gli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" del Dipartimento di Protezione Civile e della Conferenza delle Regioni e Province Autonome (ICMS, 2008);

- con Legge n. 77/2009, art. 11, sono state istituite risorse economiche per 7 annualità destinate a studi per la prevenzione e mitigazione del rischio sismico, tra i quali la microzonazione sismica, e che a seguito delle Ordinanze di ripartizione delle risorse alle Regioni, si è provveduto all'assegnazione dei contributi alle Amministrazioni Locali dell'Emilia-Romagna per la realizzazione di tali studi;
- per il coordinamento a scala nazionale dei suddetti studi, ai sensi dell'art. 5, c. 7, dell'OPCM 3907/2010, è stata istituita una Commissione Tecnica per il supporto e monitoraggio degli studi di microzonazione sismica, la quale ha promosso la redazione di vari documenti d'indirizzo, quali linee guida e standard di rappresentazione e archiviazione informatica, disponibili nel sito web http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp;
- alla luce dei recenti studi di microzonazione sismica realizzati per la ricostruzione dei Comuni dell'Italia Centrale colpiti dalla sequenza sismica iniziata il 24 agosto 2016, la suddetta Commissione Tecnica, nella versione 4.1 degli standard MS (disponibili nel sito web <https://www.centromicrozonazione.sismica.it/it/download/category/3-linee-guida>), richiede la valutazione dei fattori di amplificazione sismica anche in termini di accelerazione per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s, tra 0,4 e 0,8 s e tra 0,7 e 1,1 s (v. verbale della riunione della Commissione Tecnica del 19/10/2017, prot. PG.2017.0701200 del 06/11/2017) e che tali parametri non sono previsti nei citati indirizzi regionali (Delibera Assemblea Legislativa n. 112/2007 e propria deliberazione n. 2193/2015);
- in data 6 aprile 2018 il CNR-IDPA, Istituto che ha curato le tabelle dell'Allegato A2 della Delibera Assemblea Legislativa n. 112/2007 e dell'aggiornamento propria deliberazione n. 2193/2015, ha inviato un'integrazione all'Allegato A2 contenente tabelle per la valutazione dei fattori di amplificazione sismica anche in termini di accelerazione per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s, tra 0,4 e 0,8 s, tra 0,7 e 1,1 s;
- in data 21 maggio 2018 il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, lo stesso che ha curato l'Allegato A3 della Delibera Assemblea Legislativa n. 112/2007 e dell'aggiornamento propria deliberazione n. 2193/2015, ha trasmesso la revisione dell'Allegato A3;

Considerato inoltre che al fine di adempiere agli obblighi delle sopra richiamate NTC 2018 occorre fornire ai geologi e ai progettisti un quadro di riferimento della pericolosità sismica locale adeguatamente definito, che consenta di predisporre programmi di indagini geologiche e geotecniche e analisi della risposta sismica locale a scala di manufatto più mirati ed economicamente più adeguati al tipo di effetti attesi nell'area di interesse;

Viste le modifiche di alcune parti dell'Allegato A e degli Allegati tecnici alla propria deliberazione n. 2193/2015, rese necessarie dall'approvazione della L.R. n. 24/2017 e dalle revisioni degli Allegati A2 e A3 sopra indicate;

Si ritiene pertanto opportuno provvedere all'aggiornamento dell'atto di indirizzo di cui alla citata propria deliberazione n. 2193/2015, al fine di indirizzare l'attività pianificatoria degli Enti locali, per definire in modo omogeneo i criteri e le modalità di analisi della risposta sismica locale e di microzonazione sismica del territorio regionale;

Ritenuto per quanto sopra detto di procedere, ai sensi degli articoli 22, comma 2, e 49 della L.R. n. 24/2017, all'approvazione dell'aggiornamento degli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale

e urbanistica”, di cui alla propria deliberazione n. 2193/2015, attraverso la modifica dell’Allegati A e degli Allegati tecnici della stessa deliberazione, con quelli facenti parte integrante del presente atto al fine di ridefinire le procedure e le specifiche tecniche per la microzonazione sismica del territorio regionale;

Ritenuto inoltre opportuno stabilire che l’atto di coordinamento contiene prescrizioni da osservare ai fini dell’approvazione degli atti di programmazione territoriale e di pianificazione territoriale ed urbanistica, fatta salva la possibilità, per gli atti di programmazione e pianificazione già adottati alla data di pubblicazione della presente deliberazione, di concludere il procedimento di approvazione in conformità al testo previgente dell’atto di indirizzo e coordinamento n. 2193 del 2015;

Dato atto che sulla proposta del citato atto allegato, definito nell’ambito del “Tavolo di monitoraggio per l’applicazione della legge regionale sulla tutela e l’uso del territorio”, di cui alla nostra deliberazione n. 954 del 25.06.2018, si è espresso con parere favorevole il CAL – Consiglio delle Autonomie Locali, a norma dell’art. 49, comma 3, della L.R. n. 24/2017, e dell’art. 6 della L.R. n. 13/2009, nella seduta dell’8 aprile 2019 (prot. PG n.0349964 dell’8 aprile 2019);

Richiamate le proprie deliberazioni sulle competenze delle strutture organizzative, l’esercizio delle funzioni dirigenziali, le misure per la trasparenza e la prevenzione della corruzione e il sistema dei controlli interni:

- n. 2416 del 29/12/2008 recante "Indirizzi in ordine alle relazioni organizzative e funzionali tra le strutture e sull'esercizio delle funzioni dirigenziali" e le successive modifiche, per quanto applicabile;

- n. 468/2017 recante “Il sistema dei controlli interni nella Regione Emilia-Romagna”;

- n.56 del 25/1/2016 recante “Affidamento degli incarichi di Direttore Generale della Giunta regionale, ai sensi dell’art. 43 della L.R. n.43/2001”;

- n.270 del 29/2/2016 recante “Attuazione prima fase della riorganizzazione avviata con delibera n. 2189/2015”;

- n.622 del 28.04.2016 recante “Attuazione seconda fase della riorganizzazione avviata con delibera n. 2189/2015” e la conseguente determinazione n. 7283 del 29/4/2016, recante “Modifica dell’assetto delle posizioni dirigenziali professional, conferimento di incarichi dirigenziali, riallocazione posizioni organizzative e di personale in servizio presso la Direzione Generale Cura del Territorio e dell’Ambiente”;

- n.702 del 16/5/2016 concernente “Approvazione incarichi dirigenziali conferiti nell’ambito delle Direzioni Generali - Agenzie - Istituto, e nomina dei Responsabili della prevenzione della corruzione, della trasparenza e accesso civico, della sicurezza del trattamento dei dati personali, e dell’anagrafe per la stazione appaltante”;

- n.1107 del 11/7/2016 recante “Integrazione delle declaratorie delle strutture organizzative della Giunta regionale a seguito dell’implementazione della seconda fase della riorganizzazione avviata con Delibera 2189/2015”;

- n.1681 del 17/10/2016 recante “Indirizzi per la prosecuzione della riorganizzazione della macchina amministrativa regionale avviata con delibera n. 2189/2015”;

- n.468 del 10/4/2017 recante “Il sistema dei controlli interni nella Regione Emilia-Romagna”, e le relative circolari del Capo di Gabinetto del Presidente della Giunta regionale PG/2017/0660476 del 13/10/2017 e PG/2017/0779385 del 21/12/2017, recanti indicazio-

ni procedurali per rendere operativo il sistema dei controlli interni;

Visti:

- il D.lgs. 14 /3/2013, n.33 “Riordino della disciplina riguardante gli obblighi di pubblicità, trasparenza e diffusione di informazioni da parte delle pubbliche amministrazioni” e ss.mm.ii.;

- la propria deliberazione n.122 del 28/01/2019 avente ad oggetto, “Approvazione piano triennale di prevenzione della corruzione 2019 -2021”, ed in particolare l’Allegato D “Direttiva di indirizzi interpretativi per l’applicazione degli obblighi di pubblicazione previsti dal d.lgs. n.33 del 2013. Attuazione del piano triennale di prevenzione della corruzione 2019-2021;

- le circolari del Capo di Gabinetto del Presidente della Giunta regionale PG/2017/0660476 del 13 ottobre 2017 e PG/2017/0779385 del 21 dicembre 2017 relative ad indicazioni procedurali per rendere operativo il sistema dei controlli interni predisposte in attuazione della propria deliberazione n. 468/2017;

Dato atto che il responsabile del procedimento ha dichiarato di non trovarsi in situazione di conflitto, anche potenziale, di interessi;

Dato atto dei pareri allegati;

Su proposta dell’Assessore alla Sicurezza Territoriale. Difesa del Suolo e della Costa, Protezione Civile e Politiche Ambientali e della Montagna e dell’Assessore ai Trasporti, Reti di Infrastrutture Materiali e Immateriali, Programmazione Territoriale e Agenda Digitale;

a voti unanimi e palesi

delibera:

1. di approvare, ai sensi degli articoli 22, comma 2, e 49 della L.R. n. 24 del 2017, l’aggiornamento dell’atto di coordinamento tecnico, denominato “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica” di cui alla propria deliberazione n. 2193/2015, per ridefinire i criteri, le procedure e le specifiche tecniche per la microzonazione sismica del territorio regionale;

2. di provvedere, per ragioni di certezza del testo normativo vigente, alla approvazione e pubblicazione dell’intero testo, ora denominato “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)”, allegato parte integrante e sostanziale della presente deliberazione;

3. di stabilire che il presente atto di coordinamento tecnico deve essere osservato per la predisposizione e approvazione degli atti di pianificazione territoriale ed urbanistica e dei piani settoriali a valenza territoriale, fatti salvi gli strumenti approvati in attuazione della disciplina transitoria stabilita dalla L.R. 21 dicembre 2017, n. 24 (Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio) i quali possono essere predisposti e approvati in conformità all’atto di indirizzo e coordinamento previgente (propria deliberazione n. 2193/2015);

4. di dare atto che, per quanto previsto in materia di pubblicità, trasparenza e diffusione di informazioni, si provvederà ai sensi delle disposizioni normative ed amministrative richiamate in parte narrativa;

5. di pubblicare la presente deliberazione sul Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna Telematico e sul sito web della Regione;

6. di stabilire che la presente deliberazione entra in vigore il giorno stesso della sua pubblicazione sul Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna Telematico.

ALLEGATO A**Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)****1 - INTRODUZIONE****2 - DISPOSIZIONI GENERALI**

2.1 - Zone da indagare

2.2 - Formato dei dati e degli elaborati

2.3 - Sperimentazione della valutazione del rischio sismico nelle procedure di formazione degli strumenti di pianificazione urbanistica e territoriale

3 – PRIMA FASE - INDIVIDUAZIONE DELLE AREE SOGGETTE AD EFFETTI LOCALI**3.1 - Primo livello di approfondimento**

3.1.1 - Elaborati da produrre

3.1.2 - Acquisizione dei dati

4 – SECONDA FASE - ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO**4.1 - Secondo livello di approfondimento – analisi semplificata**

4.1.1 - Elaborati da produrre

4.1.2 - Acquisizione dei dati

4.2 - Terzo livello di approfondimento – analisi approfondita

4.2.1 - Elaborati da produrre

4.2.2 - Acquisizione dei dati

5 - RECEPIMENTO DEGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA NEGLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA

ALLEGATO A1 – Indicazioni per l’elaborazione della cartografia delle aree suscettibili di effetti locali (primo livello di approfondimento).

ALLEGATO A2 – Tabelle e formule per la valutazione dei fattori di amplificazione sismica per le analisi del secondo livello di approfondimento e per la valutazione degli effetti topografici.

ALLEGATO A3 – Procedure di riferimento per le analisi di terzo livello di approfondimento.

ALLEGATO A4 – Spettri di risposta rappresentativi e segnali di riferimento per il calcolo della risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello di approfondimento.

1 - INTRODUZIONE

Dal 17 maggio 2007, data di pubblicazione ed entrata in vigore degli indirizzi regionali per la microzonazione sismica approvati con DAL 112/2007, numerosi sono gli studi di pericolosità sismica locale a scala di area vasta e gli studi di microzonazione sismica realizzati da Province, Comuni e Unioni di Comuni.

Tutte le Amministrazioni Provinciali hanno individuato e mappato le condizioni di pericolosità locale presenti nel territorio di competenza che possono indurre effetti locali in caso di terremoto, fornendo così indicazioni per gli studi di microzonazione sismica a scala comunale.

Per quanto riguarda la microzonazione sismica, circa il 75% dei Comuni è dotato di studi di livello 2 o 3 adeguati agli standard regionali e nazionali; tali studi sono consultabili all'indirizzo web <http://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/>.

Così come specificato nell'art. A.2 comma 4 della LR 20/2000 e confermato dall'art. 22 comma 2 della LR 24/2017¹ gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica concorrono alla riduzione del rischio sismico attraverso analisi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione urbanistica ed orientano le proprie scelte localizzative, i possibili processi di trasformazione urbana e la realizzazione delle opere verso scenari di prevenzione e mitigazione del rischio sismico.

A tal fine, il quadro conoscitivo degli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica deve perseguire lo scopo di migliorare la conoscenza delle componenti che determinano il rischio sismico nonché fornire criteri di scelta finalizzati alla prevenzione e alla riduzione dello stesso, secondo un approccio graduale e programmatico alle varie scale e rispetto ai differenti strumenti di pianificazione comunale.

Pertanto, nel definire il quadro conoscitivo, è necessario avere riguardo alle parti di territorio interessate dai rischi per le opere e le attività umane determinate anche dalla pericolosità sismica.

Queste conoscenze della pericolosità sismica potenziale del territorio consentono alla pianificazione di evitare l'insorgenza di nuovi rischi e la mitigazione del rischio sismico attraverso la localizzazione di interventi in aree esposte a minor pericolo e la realizzazione degli stessi sulla base degli esiti degli studi.

Scopo del presente atto di indirizzo e coordinamento è quello di fornire i criteri per l'individuazione delle aree soggette ad effetti locali e la microzonazione sismica del territorio, e precisare i relativi obblighi, in modo da orientare le scelte della pianificazione verso aree caratterizzate da minore pericolosità sismica.

Gli studi della pericolosità sismica di base e della pericolosità locale² hanno come obiettivo:

- l'individuazione delle aree dove in occasione di terremoti possono verificarsi effetti locali;
- la stima quantitativa della risposta sismica locale dei depositi e delle morfologie presenti nell'area di indagine;

¹ Sulla pianificazione urbanistica e la riduzione del rischio sismico nella LR 24/2017 (*Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio*), oltre al citato art. 22, comma 2, vedi anche: art. 1, comma 2; artt. 18, 19; 21 e 23; art. 25, comma 2; art. 31, comma 2; art. 34; art. 35 commi 4 e 5.

² La componente pericolosità del rischio sismico dipende:

- dalle caratteristiche sismiche dell'area, cioè dalle sorgenti sismiche, dall'energia, dal tipo e dalla frequenza dei terremoti; questi aspetti sono comunemente indicati come "pericolosità sismica di base";
- dalle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio, in quanto alcuni depositi e forme del paesaggio possono modificare le caratteristiche del moto sismico in superficie e costituire aspetti predisponenti al verificarsi di effetti locali quali fenomeni di amplificazione o di instabilità dei terreni (cedimenti, frane, fenomeni di liquefazione); questi aspetti sono comunemente indicati come "pericolosità sismica locale".

- la suddivisione del territorio in zone a diversa pericolosità sismica locale (microzonazione sismica).

I risultati dell'analisi della pericolosità sismica locale e microzonazione sismica devono essere recepiti negli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica e di protezione civile.

2 - DISPOSIZIONI GENERALI

La microzonazione sismica è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento (risposta sismica locale). La microzonazione sismica è pertanto un efficace strumento di prevenzione e riduzione del rischio sismico, in particolare se realizzato e applicato fino dalle prime fasi di pianificazione urbanistica, in quanto consente di indirizzare le scelte urbanistiche verso aree a minore pericolosità sismica e/o fornire indicazioni per scelte progettuali che tengano adeguatamente conto delle condizioni di pericolosità sismica locale.

Gli studi di microzonazione sismica prevedono diversi livelli di approfondimento in funzione delle finalità e delle applicazioni nonché degli scenari di pericolosità locale.

Lo studio di microzonazione sismica deve essere descritto in una relazione che indichi chiaramente il livello di approfondimento, le indagini effettuate ed i risultati ottenuti; deve essere prodotta una cartografia dettagliata dello stato del territorio.

La microzonazione sismica è riferimento necessario per la Valutazione di Sostenibilità Ambientale e Territoriale (VALSAT) preventiva delle singole scelte del piano (artt. 18 e 19 della LR 24/2017).

Per la microzonazione sismica si identificano **due fasi di analisi con diversi livelli di approfondimento.**

La prima fase di analisi è diretta a definire gli scenari di pericolosità sismica locale, cioè identificare le parti di territorio suscettibili di effetti locali (amplificazione del moto sismico, instabilità dei versanti, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ...).

L'individuazione delle aree soggette ad effetti locali si basa su rilievi, osservazioni e valutazioni di tipo geologico e geomorfologico, svolti a scala territoriale, associati a raccolte di informazioni sugli effetti indotti dai terremoti passati. Tale analisi viene svolta soprattutto mediante elaborazione dei dati disponibili in sede di predisposizione del piano territoriale di livello provinciale o metropolitano³ e concorre alla definizione delle scelte di piano, fornendo prime indicazioni sui limiti e le condizioni per la pianificazione nelle suddette aree. Il quadro conoscitivo della pianificazione urbanistica comunale presenta una cartografia della pericolosità sismica locale, derivata dalle previsioni della pianificazione d'area vasta ma ad una scala di maggior dettaglio, limitatamente agli areali da indagare di cui al par. 2.1. lettere b) e c).

La seconda fase di analisi ha come obiettivo la microzonazione sismica del territorio indagato.

Sulla base degli scenari individuati dalle analisi svolte nel corso della prima fase, nella seconda fase si attuano **due diversi livelli di approfondimento:** a) un'analisi semplificata (secondo livello di approfondimento) e b) una analisi approfondita (terzo livello di approfondimento), come di seguito specificato:

- a) nelle aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti stabili, compresi quelli con coperture di spessore circa costante e acclività $\leq 15^\circ$, vale a dire in tutte le zone non interessate da instabilità nelle quali il modello stratigrafico può essere assimilato ad un modello fisico

³ Si intende il PTM e il PTAV di cui, rispettivamente, agli artt. 41 e 42 LR 24/2017, ed in via transitoria, fino all'approvazione di tali nuovi strumenti, il PTCP di cui all'art. 26 della previgente LR 20/2000.

monodimensionale, si ritiene sufficiente **un'analisi semplificata (secondo livello di approfondimento)**, cioè l'analisi della pericolosità sismica locale può essere basata, oltre che sull'acquisizione di dati geologici e geomorfologici più dettagliati di quelli rilevati nel primo livello, su prove geofisiche e prove geotecniche in sito di tipo standard e l'amplificazione del moto sismico può essere stimata attraverso tabelle e formule. Il numero delle verticali indagate deve essere tale da consentire un'adeguata caratterizzazione litostratigrafica e geofisica spaziale dei terreni e delle formazioni presenti nell'area di studio;

- b) **un'analisi più approfondita (terzo livello di approfondimento)** è invece richiesta per la definizione di indici di rischio negli areali che presentano le caratteristiche elencate al successivo paragrafo 2.1, lettera c), specificamente individuati dalla cartografia della pericolosità sismica locale predisposta dai piani di area vasta e recepita nel quadro conoscitivo dei piani urbanistici comunali (vedere Allegato A1).

L'analisi approfondita richiede un significativo numero di prove geofisiche e geotecniche, sia in sito che in laboratorio, rivolte alla definizione del comportamento dei terreni sotto sollecitazione dinamica, e l'impiego di specifiche procedure di elaborazione per la stima degli indici di rischio.

Come già accennato in precedenza, la prima fase di analisi, (primo livello di approfondimento), volta alla individuazione delle aree potenzialmente soggette ad effetti locali, viene attuata già **nell'ambito della pianificazione a scala di area vasta provinciale**, relativamente all'intero territorio, ed è recepita e integrata, ad una scala di maggior dettaglio, nella pianificazione urbanistica comunale, limitatamente agli areali da indagare di cui al par. 2.1. lettere b) e c).

La seconda fase, volta all'analisi della risposta sismica locale e microzonazione sismica del territorio, è prescritta in particolare nelle seguenti ipotesi:

1. nei casi in cui sia sufficiente un'analisi semplificata (secondo livello di approfondimento), la stessa è richiesta per la predisposizione e approvazione degli **strumenti generali di pianificazione urbanistica comunale**⁴ e deve interessare gli areali indicati al successivo paragrafo 2.1. lettera b);
2. nei casi in cui sia necessaria un'analisi più approfondita (terzo livello di approfondimento), la stessa interessa gli areali indicati al successivo paragrafo 2.1. lettera c), e:
 - **può essere svolta** dal Comuni nell'ambito della predisposizione e approvazione degli **strumenti generali di pianificazione urbanistica comunale**⁵, al fine di accertare gli effettivi fattori limitanti o condizionanti le trasformazioni urbane presenti in detti areali;
 - **è comunque richiesta obbligatoriamente** per la predisposizione e approvazione degli **strumenti di pianificazione urbanistica attuativa**⁵ che prevedano la localizzazione e l'attuazione in detti areali dei seguenti interventi:
 1. nuove urbanizzazioni;
 2. l'addensamento e la sostituzione urbana⁶;
 3. la ristrutturazione urbanistica⁷,

⁴ In particolare, per il PUG, di cui all'art. 31 LR 24/2017, ed in via transitoria, fino all'approvazione di tale strumento, per il PSC di cui all'art. 28 della previgente LR 20/2000. Inoltre, detta analisi è richiesta per tutti i procedimenti e atti che comportino varianti alla pianificazione urbanistica, relativamente all'ambito territoriale interessato dalla variante.

⁵ Per una indicazione completa degli strumenti urbanistici attuativi che devono dotarsi dell'analisi di terzo livello si veda l'elenco di cui al paragrafo 4.2. punti 1, 2 e 3.

⁶ Art. 7, comma 4, lettera c), LR 24/2017.

⁷ Art. 7, comma 4, lettera b), LR 24/2017.

4. edifici di interesse strategico e opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli interventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile e edifici e opere infrastrutturali che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso.

Per il calcolo degli effetti locali, nelle indagini di terzo livello, si devono impiegare come segnali di riferimento i dati contenuti nell'Allegato 4 e nel database disponibile nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica – Microzonazione Sismica".

Sulla base di questi dati è possibile calcolare, per ogni punto della griglia⁸, le cui coordinate sono disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica – Microzonazione Sismica", gli accelerogrammi e lo spettro di risposta riferito ad un periodo di ritorno $T_R = 475$ anni (corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) e ad uno smorzamento $\zeta = 5\%$.

Sia nel secondo che nel terzo livello di approfondimento devono essere valutati gli effetti della topografia; l'amplificazione determinata dalle condizioni topografiche potrà essere stimata con la procedura indicata nell'Allegato A2 (punto A2.2)⁹.

Le indagini realizzate per la microzonazione sismica forniscono utili indicazioni anche per la scelta localizzativa e la realizzazione di opere; non si è tuttavia esentati dall'esecuzione delle indagini e degli studi integrativi richiesti dalla normativa vigente per la progettazione e la realizzazione delle costruzioni.

Nelle parti di territorio in cui, a seguito degli approfondimenti di terzo livello, la pericolosità risulti molto elevata, devono essere attentamente valutate la possibilità e l'opportunità di preferire una localizzazione alternativa dell'intervento (in particolare di interventi di nuova urbanizzazione o di addensamento o sostituzione urbana).

2.1 - Areali da indagare

Gli ambiti su cui effettuare le indagini variano a seconda della scala dello strumento di pianificazione considerato e del livello di approfondimento delle analisi:

- a) a scala d'area vasta (provinciale o metropolitana¹⁰), occorre indagare l'intero territorio (con il primo livello di approfondimento);
- b) a scala comunale, partendo dagli scenari di pericolosità sismica locale definiti dalla cartografia di area vasta di prima fase, gli areali da indagare con un'**analisi semplificata (secondo livello di approfondimento)** comprendono:
 - b) 1. il territorio urbanizzato, perimetrato ai sensi dell'art. 32, commi 2 e 3, della L.R. n. 24/2017;
 - b) 2. le aree permeabili collocate all'interno del territorio urbanizzato, non dotate di infrastrutture per l'urbanizzazione degli insediamenti, per le quali il PUG consideri ammissibili interventi di trasformazione edilizia, di cui all'art. 9, comma 1, lett. c), della L.R. n. 24/2017;
 - b) 3. le parti del territorio extraurbano, contermini al territorio urbanizzato, che non presentano fattori preclusivi o fortemente limitanti alle trasformazioni urbane, di cui all'art. 35, comma 6, LR 24/2017;

⁸ I punti della griglia regionale sono derivati da quelli della griglia delle mappe interattive di pericolosità sismica INGV.

⁹ I valori che si ricavano dalle formule indicate nell'Allegato A2 (punto A2.2) potrebbero portare a sovrastima. Tali valori possono essere sostituiti dai risultati di valutazioni della risposta sismica locale ottenuti con le procedure previste dal terzo livello di approfondimento.

¹⁰ Ossia nell'ambito del PTM e del PTAV di cui, rispettivamente, agli artt. 41 e 42 LR 24/2017, ed in via transitoria, nell'ambito del PTCP di cui all'art. 26 della vigente LR 20/2000.

- b) 4. gli agglomerati posti in territorio rurale di dimensioni significative (ad es. insediamenti nastriformi attestati su viabilità, nuclei situati in continuità del territorio urbanizzato, etc.)
- b) 5. le fasce di territorio riguardanti le reti infrastrutturali di nuova previsione (per la mobilità, acquedottistiche, fognarie, energetiche e relativi impianti tecnologici) e i corridoi destinati al potenziamento e alla razionalizzazione dei sistemi per la mobilità.
- c) le aree da indagare con un'**analisi più approfondita (terzo livello di approfondimento)** sono riferite agli ambiti (individuati sempre dalla cartografia della pericolosità sismica locale di area vasta di prima fase) che presentano le seguenti situazioni:
 - c) 1. aree suscettibili di liquefazione o densificazione;
 - c) 2. aree di versante instabili e potenzialmente instabili;
 - c) 3. aree con rapide variazioni della profondità del *bedrock* sismico, come ad esempio le valli strette e profondamente incise, nelle quali il modello geologico non può essere assimilato ad un modello fisico monodimensionale; in questo caso sono raccomandate analisi bidimensionali;
 - c) 4. aree suscettibili di effetti differenziali (zone di contatto laterale tra litotipi con caratteristiche fisico – meccaniche molto diverse, zone di faglia attiva e capace, zone con cavità sepolte).

Le indagini e le analisi devono essere estese ad un'adeguata fascia limitrofa ai territori e agli areali sopra citati e alle situazioni di pericolosità locale (es. frane) il cui comportamento è potenzialmente in grado di influenzare i risultati della microzonazione nell'edificato.

Le porzioni di territorio rappresentate nelle cartografie di primo e secondo livello dovranno comprendere un adeguato intorno delle strutture di protezione civile ritenute strategiche per il superamento dell'emergenza sismica e oggetto dell'analisi della condizione limite per l'emergenza¹¹.

2.2 - Formato dei dati e degli elaborati

Per il formato dei dati e allo scopo di permettere lo scambio delle informazioni tra Enti, i dati e gli elaborati cartografici devono essere conformi, ai fini della confrontabilità geografica digitale, a quanto previsto al punto A.1 della Deliberazione del Consiglio Regionale 28 maggio 2003, n. 484 e a ogni successivo aggiornamento.

I risultati e gli elaborati devono essere forniti su supporto digitale secondo le specifiche della versione più aggiornata delle linee guida del Dipartimento della Protezione Civile.

2.3 - Sperimentazione della valutazione della pericolosità sismica locale nelle procedure di formazione degli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica

Per la realizzazione e l'utilizzo, nel processo di pianificazione, degli elaborati di seguito illustrati, le Amministrazioni potranno avvalersi del supporto del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e del Servizio Pianificazione Territoriale e Urbanistica, dei Trasporti e del Paesaggio della Regione Emilia-Romagna.

¹¹ V. "Manuale per l'analisi della condizione limite per l'emergenza (CLE) dell'insediamento urbano. Versione 1.0". Commissione tecnica per la microzonazione sismica. Roma 2014. http://www.protezionecivile.gov.it/media-comunicazione/pubblicazioni/dettaglio/-/asset_publisher/default/content/manuale-per-l-analisi-della-condizione-limite-per-l-emergenza-cle-dell-insediamento-urbano

3 – PRIMA FASE - INDIVIDUAZIONE DELLE AREE SOGGETTE AD EFFETTI LOCALI

3.1 - Primo livello di approfondimento

Il primo livello di approfondimento ha le seguenti finalità:

- individuare le aree suscettibili di effetti locali in cui effettuare le successive indagini di microzonazione sismica;
- definire il tipo di effetti attesi;
- indicare, per ogni area, il livello di approfondimento necessario;
- descrivere le caratteristiche delle unità geologiche del sottosuolo, in termini di litologia, stratigrafia, tettonica e geometria per definire il modello geologico di base per la microzonazione sismica.

In sede di elaborazione di studi di area vasta (e in particolare nelle analisi delle condizioni di pericolosità sismica locale per il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, PTCP) è stata prodotta, per l'intero territorio, la "Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali".

In tale cartografia sono state evidenziate le zone caratterizzate da differenti scenari di pericolosità locale con indicazione degli effetti locali attesi.

Essa è dunque uno strumento propedeutico alla pianificazione urbanistica comunale, già disponibile anche nell'ambito delle informazioni ambientali e territoriali di cui all'art. 23 LR 24/2017, e come tale deve essere attentamente considerato per indirizzare le scelte verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica.

Il Piano Urbanistico Generale (il PUG della LR 24/2017, come già il PSC della previgente LR 20/2000), dovrà realizzare una cartografia della pericolosità sismica locale, ad una scala di maggior dettaglio, individuando le parti del territorio caratterizzate dai differenti scenari di pericolosità sismica locale.

In particolare, le analisi individuano le seguenti parti del territorio:

- aree che non necessitano di approfondimento, in quanto si ritiene il pericolo assente o trascurabile: si tratta di parti di territorio per le quali gli studi di primo livello non hanno individuato specifiche controindicazioni all'urbanizzazione o alla modifica di destinazione d'uso;
- aree che necessitano di una seconda fase di approfondimento al fine di valutare la pericolosità sismica:
 - aree oggetto di un'analisi semplificata (secondo livello di approfondimento - punto 2a - disposizioni generali);
 - aree oggetto di un'analisi approfondita (terzo livello di approfondimento – punto 2b - disposizioni generali).

Le previsioni del PUG (o del PTM/PTAV che assuma anche il ruolo di PUG¹²) in merito agli areali elencati al precedente paragrafo 2.1. b) dovranno essere coerenti con le risultanze del quadro conoscitivo relative al rischio sismico e, di conseguenza, nella VALSAT del piano dovrà essere contenuta un'esplicita valutazione della coerenza degli interventi di trasformazione ipotizzati, in considerazione anche delle altre criticità ambientali, in modo tale da valutare in maniera integrata tutte le interazioni potenzialmente negative.

¹² V. art. 51 comma 1 della LR 24/2017.

Sulla base della medesima cartografia comunale, le disposizioni del PUG (o del PTM/PTAV che assuma anche il ruolo di PUG¹³) forniscono indirizzi e prescrizioni necessari alla progettazione attuativa/operativa per le parti del territorio che risultano maggiormente esposte a pericolosità sismica.

3.1.1 - Elaborati da produrre

Per gli studi di area vasta (PTCP/PTM/PTAV), devono essere prodotti i seguenti elaborati:

- Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali alla scala 1:25.000 da compilarsi secondo quanto previsto nell'Allegato A1;
- Relazione riguardante le condizioni di pericolosità sismica della zona analizzata.

Per i PUG¹⁴ deve essere realizzata una "Carta comunale delle aree suscettibili di effetti locali" a scala almeno 1:10.000, secondo quanto previsto nell'Allegato A1. In questa carta, che costituisce l'elaborato principale di questo livello di approfondimento a scala comunale, devono essere chiaramente indicate le aree che dovranno essere oggetto delle indagini di successivo e ulteriore approfondimento. A corredo dovranno essere fornite anche le cartografie di base (geologica, geomorfologia, litologica, dello spessore delle coperture, della profondità della falda, etc.) e i profili litostratigrafici utilizzati.

In particolare, dovranno essere prodotti i seguenti elaborati cartografici:

1) Carta delle indagini; in questa cartografia, a scala almeno 1:10.000 (preferibilmente di maggiore dettaglio), dovranno essere chiaramente indicate le prove pregresse e quelle di nuova esecuzione (anche quelle eseguite per i successivi livelli di approfondimento); tutte le prove dovranno essere classificate in base alla tipologia e alla profondità raggiunta.

2) Carta geologico-tecnica, derivata dalla revisione a scala dettagliata (almeno 1:10.000) dei rilievi geologici e morfologici disponibili. In questa cartografia dovranno essere rappresentati gli elementi geologici e morfologici locali d'interesse per l'analisi della pericolosità sismica, in particolare quelli che possono modificare il moto sismico in superficie. I più comuni elementi geologici e morfologici che possono determinare effetti locali in Emilia-Romagna sono indicati nell'Allegato A1 del presente atto; in particolare dovranno essere chiaramente perimetrate le coperture detritiche, le aree instabili e quelle potenzialmente soggette a dissesti. Questa cartografia dovrà essere corredata da un numero adeguato di sezioni litostratigrafiche significative, orientate sia trasversalmente sia longitudinalmente ai principali elementi geologici (strutture tettoniche, forme del paesaggio e morfologie sepolte, assi dei bacini, ...).

Data la disponibilità della cartografia geologica 1:10.000 per tutto il settore appenninico regionale, per gli studi nei Comuni montani e delle zone collinari la redazione della carta geologico-tecnica è raccomandata per l'intero territorio comunale.

3) Carta delle frequenze naturali dei terreni, a scala almeno 1:10.000 (preferibilmente di maggiore dettaglio), derivate da indagini speditive di sismica passiva (HVSR da misure di vibrazioni ambientali) o, se disponibili, SSR da registrazioni di terremoti. In questa carta dovranno essere riportati tutti i punti di misura, con associato il risultato della prova (valore del picco più significativo nell'intervallo 0,2÷20 Hz, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale f_0 , e di altri picchi significativi o indicazione dell'assenza di picchi). Ove possibile, il territorio indagato sarà suddiviso in base a classi di frequenza allo scopo di distinguere aree caratterizzate da assenza di fenomeni di risonanza significativi (nessun massimo relativo significativo nelle

¹³ Vedi nota sopra.

¹⁴ E, in via transitoria, per i PSC o relative varianti generali il cui procedimento è stato avviato ai sensi dell'art.3, commi 4 e 5 della LR 24/2017.

funzioni HVSR o SSR nell'intervallo 0,2÷20 Hz) o da presenza di fenomeni di risonanza, distinguendo fra spessori di copertura attesi maggiori di 200 m (indicativamente $f_0 \leq 0,6$ Hz), compresi tra 200 e 80 m (indicativamente $0,6 \text{ Hz} < f_0 \leq 1$ Hz), compresi fra 80 e 30 m (indicativamente $1 \text{ Hz} < f_0 \leq 2$ Hz), compresi fra 30 e 10 m (indicativamente $2 \text{ Hz} < f_0 \leq 8$ Hz), minori di 10 m (indicativamente $f_0 > 8$ Hz). Se possibile dovranno essere distinte anche le zone caratterizzate da contrasti di impedenza elevati (ampiezza picco HVSR ≥ 3), moderati (ampiezza picco $2 \leq \text{HVSR} < 3$), bassi (ampiezza picco $1,5 \leq \text{HVSR} < 2$) e assenza di significativi contrasti (ampiezza picco HVSR $< 1,5$).

Tale cartografia è di particolare utilità al fine di evitare il fenomeno della doppia risonanza nell'interazione suolo-strutture; dovranno perciò essere adeguatamente considerate le frequenze naturali del terreno e quelle di vibrazione delle strutture, ponendo particolare attenzione alle aree in cui si rilevano maggiori contrasti di impedenza.

4) Carta delle aree suscettibili di effetti locali; è il documento fondamentale di questo livello di approfondimento (cfr. carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, MOPS, degli ICMS, 2008). In questa cartografia dovranno essere chiaramente indicate, a scala dettagliata (almeno 1:10.000), le aree in cui si ritiene necessario effettuare indagini e analisi di microzonazione sismica e i livelli di approfondimento ritenuti necessari. Nelle aree di pianura tale cartografia dovrà essere corredata da una cartografia rappresentativa della profondità e tipologia dei depositi di sottosuolo che possono influenzare il moto in superficie (es.: isobate del tetto dei depositi grossolani, come le ghiaie di conoide; isobate del tetto di corpi sabbiosi significativi presenti nei primi 20 m di profondità; isobate del tetto della falda; isobate della base dei depositi continentali; altre isobate di discontinuità stratigrafiche importanti; ...).

Data la disponibilità della cartografia geologica 1:10.000 per l'intero settore appenninico regionale, per gli studi nei Comuni montani e delle zone collinari la redazione della carta delle aree suscettibili di effetti locali (o delle MOPS) è raccomandata per l'intero territorio comunale.

Le diverse aree suscettibili di effetti locali dovranno essere caratterizzate in base alla successione litostratigrafica; all'interno di ogni area la successione litostratigrafica dovrà risultare il più possibile omogenea in prospettiva dell'analisi della risposta sismica locale.

Le aree saranno classificate in tre categorie:

- a) **zone stabili**, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura (litotipi assimilabili al substrato rigido, o *bedrock* sismico, in affioramento con morfologia pianeggiante o poco acclive); in queste zone non sono quindi richiesti ulteriori approfondimenti;
- b) **zone suscettibili di amplificazioni locali**, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, come effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale; nelle zone con variazioni stratigrafiche laterali poco significative (zone di pianura, valli ampie) sono ritenuti sufficienti approfondimenti di secondo livello; nelle zone in cui la profondità del *bedrock* sismico varia rapidamente, come nelle valli strette e nelle conche intramontane profondamente incise, nelle quali il modello geologico non è assimilabile ad un modello fisico monodimensionale, l'analisi monodimensionale, e quindi anche l'applicazione di tabelle, può portare a sottostima della risposta sismica in superficie; in tali condizioni sono raccomandate analisi bidimensionali;
- c) **zone suscettibili di instabilità**, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti, oltre i fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio; i principali tipi di instabilità attesi in Emilia-Romagna sono:
 - instabilità di versante in presenza di pendii instabili e potenzialmente instabili;
 - liquefazioni in presenza di importanti spessori di terreni granulari saturi nei primi 20 m da piano campagna; se i dati lo permettono dovranno essere indicate anche le aree

topograficamente rilevate rispetto alla piana circostante (dossi fluviali, argini, ...) in cui è possibile l'innescò di fenomeni di espansione laterale (*lateral spreading*);

- densificazioni in presenza di terreni granulari poco addensati e/o terreni coesivi poco consolidati;
- cedimenti differenziali in aree che presentano terreni con significative variazioni laterali delle caratteristiche meccaniche (zone di contatto tra litotipi significativamente diversi, zone di faglia, zone a pronunciata diversità del grado di deformabilità, ...) o in presenza di cavità sotterranee.

In queste zone sono richiesti specifici approfondimenti di terzo livello.

Nella relazione illustrativa dovranno essere descritti tutti gli elementi caratterizzanti i documenti sopra indicati e le aree in cui effettuare indagini, con indicazione del tipo di prove da realizzare. Poiché una delle finalità fondamentali di questo livello di approfondimento è la definizione del modello geologico del sottosuolo che costituirà la base per la microzonazione sismica, dovrà essere accuratamente descritta la stratigrafia e fornita una stima indicativa, su basi geologiche, della profondità dell'orizzonte ipotizzato essere il *bedrock* sismico. La definizione della profondità e geometria del *bedrock* sismico è uno degli obiettivi degli approfondimenti successivi.

3.1.2 - *Acquisizione dei dati*

Nella predisposizione della "Carta delle aree suscettibili di effetti locali", sia di area vasta che comunale, è richiesto il reperimento dei dati e delle informazioni precedentemente acquisiti in occasione di indagini di settore o per la predisposizione di strumenti di pianificazione, in particolare:

- cartografia topografica di dettaglio (tavole topografiche 1:25.000, CTR 1:5.000, carte comunali 1:2.000, modello digitale del terreno, ...) da utilizzare come supporto per i rilievi e la restituzione dei risultati e per l'analisi morfologica;
- cartografia geologica (Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo 1:10.000 e sintesi alla scala 1:25.000, cartografie allegate a strumenti di pianificazione, cartografie per progetti particolari, ...);
- cartografia dei dissesti conosciuti (Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo 1:10.000 e Inventario del dissesto 1:25.000, cartografie allegate a strumenti di pianificazione, perimetrazioni aree a rischio, altre cartografie per progetti particolari, ...);
- risultati di indagini geognostiche, geofisiche e geotecniche esistenti.

In assenza di dati che permettano un'adeguata ricostruzione del modello geologico dovranno essere eseguite apposite nuove indagini finalizzate innanzi tutto alla definizione della litostratigrafia e degli spessori delle coperture.

4 – SECONDA FASE - ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO

La seconda fase ha come obiettivo la valutazione della risposta sismica locale e la microzonazione sismica del territorio indagato.

Gli scenari identificati nella prima fase individuano due diversi livelli di approfondimento (secondo o terzo livello) caratterizzati da diversi programmi di indagine.

Il numero delle verticali indagate deve essere tale da consentire un'adeguata caratterizzazione litostratigrafica, geotecnica e geofisica spaziale dei terreni presenti nell'area in studio.

La cartografia di microzonazione sismica da utilizzare come riferimento della pericolosità sismica locale per l'analisi della condizione limite per l'emergenza sarà quella di maggiore approfondimento in H_{SM} (v. 4.1.1 punto 2); la cartografia di microzonazione sismica dovrà quindi essere estesa fino a comprendere un adeguato intorno degli edifici strategici, unità e aggregati strutturali e aree di emergenza, oggetto dell'analisi della condizione limite per l'emergenza; è raccomandata anche la caratterizzazione della pericolosità sismica locale delle fasce di territorio relative alla viabilità di accesso e connessione.

4.1 - Secondo livello di approfondimento – analisi semplificata

Il secondo livello di approfondimento ha le seguenti finalità:

- la verifica delle condizioni di pericolosità indicate dal precedente livello di approfondimento e conferma o eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la microzonazione sismica;
- la suddivisione dettagliata del territorio in base all'amplificazione attesa;
- la conferma o migliore definizione delle aree, indicate dal livello di approfondimento precedente, in cui si ritengono necessari approfondimenti di terzo livello e indicazione delle indagini e analisi da effettuare.

Questo livello minimo di approfondimento, per gli areali da indagare di cui al precedente paragrafo 2.1. b), è richiesto per l'approvazione del PUG.

L'analisi semplificata è richiesta e ritenuta sufficiente per la stima dell'amplificazione, nelle aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti stabili, compresi quelli con coperture di spessore circa costante e acclività $\leq 15^\circ$, vale a dire nelle aree in cui il modello geologico può essere assimilato ad un modello fisico monodimensionale.

Nelle aree in cui sono presenti morfologie sepolte che comportano rapide variazioni della profondità del *bedrock* sismico l'analisi monodimensionale, e quindi anche l'applicazione di tabelle, può portare a sottostima della risposta sismica in superficie; in tali condizioni sono raccomandate analisi bidimensionali.

Per la definizione dell'amplificazione ove è ritenuta sufficiente l'analisi semplificata si utilizzeranno le tabelle, le formule e le procedure indicate nell'Allegato A2.

Tale analisi ha lo scopo di valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale per l'elaborazione della carta di microzonazione. Questa fornisce indicazioni essenziali per l'elaborazione e approvazione del PUG (o del PTM/PTAV¹⁵) indicando:

- quali ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento possano essere attuati senza la necessità di eseguire nuove indagini;
- quali ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento siano subordinati allo svolgimento di ulteriori indagini di cui al par. 4.2.

¹⁵ Qualora lo stesso assuma ruolo ed effetti del PUG.

4.1.1 - Elaborati da produrre

Oltre agli elaborati del livello di approfondimento precedente dovranno essere prodotti i seguenti elaborati.

1) Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s), a scala almeno 1:10.000 (preferibilmente di maggiore dettaglio), in cui saranno ubicati tutti i punti di misura di V_s con indicazione, per ogni punto di misura, del valore di V_{SH} (in m/s) e H (in m) nelle aree in cui H non supera i 50 m, o di V_{S30} (in m/s) nelle aree di pianura dove H è maggiore di 50 m.

2) Carte di microzonazione sismica di secondo livello delle aree individuate nella “Carta comunale delle aree suscettibili di effetti locali”, a scala almeno 1:10.000, preferibilmente di maggiore dettaglio¹⁶. Questa cartografia costituisce l’elaborato principale di questo livello di approfondimento. La stima dell’amplificazione tramite procedure semplificate (utilizzo di tabelle e formule) è possibile laddove l’assetto geologico è assimilabile ad un modello fisico monodimensionale. L’amplificazione sarà quantificata in termini di PGA, SA1, SA2, SA3, SA4, SI1, SI2 e SI3 che esprimono l’amplificazione per motivi stratigrafici¹⁷, eventualmente incrementati con il fattore di amplificazione per cause topografiche S_T . Tali coefficienti di amplificazione vengono stimati impiegando le tabelle e le formule dell’Allegato A2 (punti A2.1 e A2.2) che permettono di calcolare i fattori di amplificazione sismica rispetto ad un suolo di riferimento¹⁸.

La scelta delle tabelle per la stima dell’amplificazione non dipende dalle sole caratteristiche litologiche e morfologiche dell’area ma deve essere attentamente valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità e del tipo di substrato. Per questa valutazione si raccomanda di porre particolare attenzione alla cartografia di primo livello, in particolare alla carta degli elementi geologici sepolti che possono modificare il moto in superficie e alla carta delle frequenze naturali dei terreni. La procedura per la scelta delle tabelle utilizzate dovrà essere dettagliatamente descritta nella relazione illustrativa; per rendere più chiara tale scelta si raccomanda di inserire in relazione una figura o tabella che illustri, per ogni microzona e per tutta l’area di studio, le tabelle utilizzate per la stima dell’amplificazione.

Dovranno essere perimetrare in dettaglio anche le aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello, con indicazione del tipo di effetti attesi, delle indagini e analisi di approfondimento da effettuare.

Dovrà essere prodotta anche una carta della distribuzione sul territorio dei valori di H_{SM} (Naso et al., 2019¹⁹), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), valore

¹⁶ La scala è da rapportare alle dimensioni dell’area studiata.

¹⁷ Il fattore di amplificazione (F) è dato dal rapporto tra spettro di risposta elastico di output, alla superficie del suolo in esame, e spettro di risposta elastico di input, al suolo di riferimento (rigido e pianeggiante, classe di sottosuolo A delle NTC 2018), per prefissati intervalli di periodi T , calcolati per un tempo di ritorno $T_R=475$ anni e smorzamento $\zeta=5\%$:

$F_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l’accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ al suolo di riferimento e PGA è l’accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito;

$FA = SA/SA_0$, dove SA_0 è l’integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l’integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T : SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$, SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$, SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;

$FH = SI/SI_0$, dove SI_0 è l’integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI l’integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T : SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$, SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

¹⁸ I valori riportati nelle tabelle potrebbero portare a sovrastima. Tali valori possono essere sostituiti dai risultati di valutazioni della risposta sismica locale ottenuti con le procedure previste dal terzo livello di approfondimento.

¹⁹ Naso G., Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D’Intinosante V., Ercolessi G. (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*. Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgtat0263

integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

I valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono riportati nel file all_4_coord.kmz (cartella Allegato_4.zip) disponibile nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (v. anche Allegato A4).

4.1.2 - Acquisizione dei dati

Per l'utilizzo delle tabelle è necessario determinare la stratigrafia del sottosuolo, in particolare lo spessore H della copertura e la profondità del *bedrock* sismico, e il valore di Vs nell'intervallo di spessore H.

Se nell'area sono disponibili prove pregresse che definiscono in maniera chiara la stratigrafia fino alla profondità d'interesse H potranno essere effettuate solo prove finalizzate alla definizione del valore di V_{SH} o V_{S30} , altrimenti dovranno essere realizzate anche indagini geognostiche finalizzate alla definizione della litostratigrafia e della profondità del *bedrock* sismico.

È richiesta anche la valutazione degli effetti topografici, secondo quanto indicato nell'Allegato A2, punto A2.2.

4.2 - Terzo livello di approfondimento – analisi approfondita

Un'analisi più approfondita è richiesta per la stima di indici di rischio negli ambiti di pericolosità sismica locale definiti dalla cartografia di area vasta di prima fase che presentano le **situazioni elencate al precedente paragrafo 2.1. lettera c)**.

Questo livello di analisi è quindi finalizzato a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree instabili e potenzialmente instabili e di quelle soggette a liquefazione e densificazione (individuate attraverso il primo livello di analisi nella cartografia delle aree suscettibili di effetti locali) ai fini della predisposizione delle previsioni del PUG o quantomeno nel momento in cui si intenda approvare la localizzazione e la realizzazione di significative trasformazioni sulle stesse.

Infatti, come è già stato anticipato al paragrafo 2, l'analisi più approfondita (terzo livello di approfondimento), **può essere svolta dal Comune** nell'ambito della predisposizione e approvazione degli **strumenti generali di pianificazione urbanistica comunale**⁵, ai fini della redazione di una più completa carta di microzonazione, per accertare gli effettivi fattori limitanti o condizionanti le trasformazioni urbane presenti in detti areali ed indirizzare le scelte localizzative verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica.

Il medesimo livello di analisi **è comunque richiesto obbligatoriamente** per la predisposizione e approvazione degli **strumenti di pianificazione urbanistica attuativa** che prevedano, negli ambiti che presentano le **situazioni elencate al precedente paragrafo 2.1. lettera c)**, la localizzazione e l'attuazione dei seguenti interventi:

1. nuove urbanizzazioni;
2. l'addensamento e la sostituzione urbana²⁰;

²⁰ Art. 7, comma 4, lettera c), LR 24/2017.

3. la ristrutturazione urbanistica²¹;
4. edifici di interesse strategico e opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli interventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile e edifici e opere infrastrutturali che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso.

Di conseguenza, i PUG che non abbiano proceduto direttamente a svolgere l'analisi di terzo livello relative alle suddette aree, recependo le indicazioni del piano territoriale di scala provinciale o metropolitana (PTCP/PTM/PTAV), devono prescrivere la predisposizione di analisi del terzo livello di approfondimento in caso di elaborazione e approvazione degli Accordi operativi e dei Piani attuativi di iniziativa pubblica (art. 38 della LR 24/2017) che prevedano la realizzazione delle significative trasformazioni appena elencate²².

Inoltre, la predisposizione di analisi del terzo livello di approfondimento è obbligatoria negli areali più volte richiamati, per tutti i **procedimenti speciali** per i quali la legge consente che l'approvazione del progetto delle medesime significative trasformazioni comporti **variante alla pianificazione urbanistica e possa essere attuato senza la necessità di piani urbanistici attuativi**, quali: il procedimento unico e l'accordo di programma, di cui gli articoli 53 e 61 della L.R. n. 24/2017; la variante ai sensi dell'art. 8 del DPR n. 160 del 2010; il provvedimento autorizzatorio unico regionale di cui all'art. 21 della L.R. n. 4 del 2018; ecc.

La zona da indagare e la scala di restituzione degli elaborati devono essere commisurate alla criticità e alle dimensioni dell'area e all'importanza dell'intervento da realizzare.

4.2.1 - Elaborati da produrre

Oltre agli elaborati dei livelli di approfondimento precedenti per le aree in cui viene effettuato il terzo livello di approfondimento dovranno essere forniti, come requisiti minimi:

- la perimetrazione dettagliata, a scala almeno 1:10.000 (preferibilmente di maggior dettaglio) delle aree indagate e i valori indicativi della pericolosità locale (indice di liquefazione, grado di stabilità, cedimenti attesi, ...);
- nel caso di analisi di risposta sismica locale, gli spettri di risposta riferiti a tali aree, per un periodo di ritorno $T_R = 475$ anni con smorzamento $\zeta = 5\%$ e le mappe di amplificazione in termini di PGA, SA1, SA2, SA3, SA4, SI1, SI2, SI3, H_{SM} e H₀₄₀₈, H₀₇₁₁, H₀₅₁₅, ovvero lo scuotimento in accelerazione (cm/s²) atteso al sito per gli intervalli di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

A corredo devono essere prodotti anche i risultati delle prove per la definizione del modello geologico del sottosuolo e per la caratterizzazione geotecnica dei terreni sia in campo statico che dinamico.

Qualora gli strumenti di pianificazione consentano la realizzazione di interventi nelle aree instabili, in quelle potenzialmente instabili e in quelle soggette a rischio di liquefazione e densificazione, dovranno essere forniti elaborati di quantificazione degli indici di rischio, degli spostamenti e dei cedimenti attesi. Tali valutazioni dovranno essere supportate da prove sperimentali in sito e in laboratorio e dovranno essere condotte in conformità ai principi e ai metodi della Geotecnica Sismica. Nell'Allegato A3 sono indicate alcune procedure di riferimento.

²¹ Art. 7, comma 4, lettera b), LR 24/2017.

²² Il medesimo livello di approfondimento è richiesto per gli strumenti urbanistici attuativi approvati nel periodo transitorio di cui all'art. 4 LR 24/2017 nei casi in cui ciò sia previsto dagli strumenti urbanistici vigenti in attuazione del previgente atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica.

Negli ambiti di studio in cui sono presenti aree suscettibili di liquefazione di estensione tale da comprendere più aggregati strutturali o aggregati strutturali estesi, se il numero delle verifiche lo consente, potrà essere effettuata una suddivisione del territorio in base al valore dell'Indice di Liquefazione I_L , interpolando i risultati delle verifiche puntuali, in aree a rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), medio ($2 < I_L \leq 5$), elevato ($5 < I_L \leq 15$) o molto elevato ($I_L > 15$).

Nella relazione dovranno essere descritti in dettaglio i procedimenti e i codici di calcolo utilizzati e i risultati delle prove sperimentali in sito e in laboratorio. Dovranno essere chiaramente specificati anche i criteri per la definizione del *bedrock* sismico.

4.2.2 - *Acquisizione dei dati*

Le valutazioni dovranno essere supportate da prove sperimentali in sito e in laboratorio e dovranno essere condotte in conformità ai principi e ai metodi della Geotecnica Sismica. Nell'Allegato A3 sono indicate alcune procedure di riferimento.

Il programma delle prove, sia nei terreni stabili che in quelli instabili, deve essere commisurato alla specificità del caso.

La tipologia e il numero delle prove devono essere adeguatamente descritti e motivati nella relazione. Dovranno essere utilizzate solo tecniche di prova di riconosciuta affidabilità per le quali esistono riferimenti nella letteratura scientifica.

Gli effetti topografici potranno essere valutati secondo quanto indicato nell'Allegato A2, punto A2.2.

I valori di velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) dovranno essere acquisiti tramite misure dirette tipo down-hole o cross-hole; laddove le condizioni geologiche lo permettano potranno essere effettuate prove penetrometriche statiche con cono sismico o con dilatometro sismico. Nel caso non sia possibile effettuare misure di velocità di propagazione delle onde sismiche con prove dirette, i valori di V_s potranno essere dedotti dalle curve di dispersione delle onde di superficie misurate.

Le prove penetrometriche statiche di nuova esecuzione per la stima dell'indice potenziale di liquefazione dovranno essere a punta elettrica (CPTe/CPTu).

Come segnale di input per le analisi di risposta sismica locale dovranno essere utilizzati gli accelerogrammi disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica – Microzonazione Sismica".

5 - RECEPIMENTO DEGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA NEGLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA

Come specificato nelle leggi regionali n. 24/2017 "Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio", e n. 19/2008 "Norme per la riduzione del rischio sismico", è obbligo per i Comuni valutare la compatibilità delle previsioni contenute negli strumenti di pianificazione con l'obiettivo della riduzione del rischio sismico.

Pertanto, gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica si devono conformare al presente atto di indirizzo provvedendo a redigere gli studi e le analisi del proprio livello di competenza e corredando lo strumento con opportune norme finalizzate alla riduzione del rischio sismico.

In particolare, si sottolinea che:

- le Province e la Città metropolitana di Bologna devono predisporre i nuovi piani territoriali di loro competenza (PTAV e PTM) secondo quanto previsto al precedente paragrafo 3, nonché corredare il Piano del conseguente apparato normativo;

- i Comuni, attuando gli indirizzi dei piani territoriali di area vasta (PTCP/PTM/PTAV), devono predisporre la microzonazione sismica costituente parte integrante del quadro conoscitivo dei PUG nell'osservanza di quanto previsto nei precedenti paragrafi 3 e 4, e sono tenuti a corredare il Piano del conseguente apparato normativo.

Gli strumenti di pianificazione approvati in attuazione della disciplina transitoria stabilita dalla L.R. 21 dicembre 2017, n. 24 (Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio) possono essere predisposti in conformità all'atto di indirizzo e coordinamento previgente (delibera di Giunta regionale n. 2193 del 2015).

* * *

ALLEGATO A1**INDICAZIONI PER L'ELABORAZIONE DELLA CARTOGRAFIA DELLE AREE SUSCETTIBILI DI EFFETTI LOCALI (PRIMO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO)**

In questa cartografia dovranno essere rappresentate tutte le condizioni geologiche e morfologiche locali che possono determinare effetti locali (amplificazione del segnale sismico, cedimenti, instabilità dei terreni, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.).

Le più comuni caratteristiche fisiche del territorio che possono determinare tali effetti in Emilia-Romagna sono le seguenti.

Terreni che possono determinare amplificazione (spessore ≥ 3 m):

- depositi di versante (accumuli di frana, detriti di falda, detriti eluvio-colluviali, detriti di versante s.l., depositi morenici, depositi da geliflusso, ...);
- depositi di conoide alluvionale;
- depositi alluvionali;
- depositi fluvio-lacustri
- riporti antropici poco addensati;

- substrato affiorante alterato o intensamente fratturato (spessore della zona di alterazione superficiale non inferiore a 3 m);
- substrato non rigido ($V_s \ll 800$ m/s)¹¹ affiorante.

Elementi morfologici che possono determinare amplificazione:

- creste, cocuzzoli, dorsali allungate, versanti con acclività $> 15^\circ$ e altezza ≥ 30 m

Depositi suscettibili di amplificazione e cedimenti:

- depositi granulari nei primi 20 m da p.c. con livello superiore della falda acquifera a profondità minore di 15 m da p.c., con composizione granulometrica che ricade nelle fasce critiche indicate nell'Allegato A3 (figura 1) (fattori predisponenti il fenomeno della liquefazione);
- depositi affioranti (spessore ≥ 3 m) di terreni granulari sciolti o poco addensati ($N_{SPT} < 15$) o di terreni coesivi soffici ($c_u \leq 70$ kPa; $V_s < 180$ m/s) e plastici ($I_p \geq 30\%$).

Aree soggette ad instabilità di versante:

- aree instabili: aree direttamente interessate da fenomeni franosi attivi;
- aree potenzialmente instabili: aree in cui, in caso di forti terremoti, potrebbero verificarsi riattivazioni (frane quiescenti) o attivazioni di movimenti franosi (tutti gli accumuli detritici incoerenti, indipendentemente dalla genesi, con acclività $> 15^\circ$; pendii costituiti da terreni prevalentemente argillosi e/o intensamente fratturati ¹² con acclività $> 15^\circ$; aree prossime a zone instabili che possono essere coinvolte dalla riattivazione del movimento franoso; scarpate subverticali; accumuli detritici incoerenti prossimi all'orlo di scarpate).

Elementi che possono determinare effetti differenziali, sia in termini di amplificazione che cedimenti e spostamenti del terreno:

- contatto laterale tra litotipi con caratteristiche fisico – meccaniche molto diverse;

¹¹ Possono rientrare in questa categoria i terreni prevalentemente argillosi e argilloso-marnosi, in particolare quelli a struttura caotica, di età terziaria e quaternaria e le sabbie plio-pleistoceniche poco addensate.

¹² Rientrano in questa categoria i terreni con spaziatura della fratturazione < 20 cm.

- faglie attive e capaci *sensu* ICMS (2008) e CTMS (2015);
- cavità sepolte.

Molte delle informazioni necessarie per la redazione della cartografia di primo livello possono essere derivate direttamente dalle carte geomorfologiche e geologiche, in particolare se disponibili a scala adeguatamente dettagliata (almeno 1:10.000) e corredate da profili geologici e logs stratigrafici¹³.

Per la realizzazione della cartografia delle aree suscettibili di effetti locali e per la caratterizzazione del comportamento sismico è di estrema utilità anche la cartografia della profondità del tetto della falda freatica.

Le carte geologiche, geomorfologiche, litologiche, dello spessore delle coperture e della profondità della falda costituiscono quindi la necessaria base informativa e perciò si raccomanda che tali carte siano sempre allegate a corredo della “Carta delle aree suscettibili di effetti locali” e della relazione.

Riferimenti bibliografici

CTMS, 2015: *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)*. Commissione tecnica per la microzonazione sismica, Gruppo di lavoro FAC. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/LineeGuidaFAC_v1_0.pdf

ICMS, 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Gruppo di lavoro MS. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137

¹³ La cartografia geologica e geotematica della Regione Emilia-Romagna stampata è reperibile presso l'Archivio Cartografico regionale ed è consultabile on line nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli; per la versione digitale occorre fare richiesta al Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.

ALLEGATO A2

TABELLE E FORMULE PER LA STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA (SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO).**A2.1 - Tabelle per il calcolo dei fattori di amplificazione sismica (secondo livello di approfondimento)**

Per la stima del fattore di amplificazione (FA) devono essere realizzate indagini geotecniche e geofisiche che permettano di definire lo spessore H del deposito di copertura e la velocità equivalente delle onde di taglio per lo spessore considerato (V_{SH} e V_{S30}) del deposito di copertura.

Per copertura si intende una coltre detritica di origine continentale (alluvionale, eluvio-colluviale, gravitativa, ...) o di alterazione presente dalla superficie al tetto del substrato geologico per un intervallo H non inferiore a 3 m. H è quindi lo spessore della copertura o profondità del substrato rigido, ovvero del *bedrock* sismico,

La velocità equivalente delle onde di taglio è definita dalle formule di seguito riportate:

$$V_{SH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

dove N è il numero di strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura, H è lo spessore totale (in m) dei terreni di copertura, o profondità del tetto del *bedrock* sismico, h_i è lo spessore (in m) dello strato i -esimo (fino al *bedrock* sismico), V_{S_i} è la velocità (in m/s) dello strato i -esimo (fino al *bedrock* sismico);

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^M \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

dove M è il numero di strati del profilo sismico fino alla profondità di 30 m, h_i è lo spessore (in m) dello strato i -esimo (fino alla profondità di 30 m), V_{S_i} è la velocità (in m/s) dello strato i -esimo (fino alla profondità di 30 m).

I FA rappresentano il rapporto fra lo scuotimento sismico, espresso con i parametri sotto indicati, valutato per la condizione geo-litologica specifica e il corrispondente scuotimento relativo alla categoria di sottosuolo A. Quest'ultimo è definito nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC (2018), come segue:

Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

I FA riportati nelle tabelle sono stati calcolati per un tempo di ritorno $T_R=475$ anni, con smorzamento $\zeta=5\%$, e sono relativi ai seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico:

- accelerazione di picco orizzontale (**PGA**)¹;

- intensità spettrale $SA = \int_{T_1}^{T_2} A(T, \zeta) dT$

dove A è lo spettro di risposta in accelerazione, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento²; sono stati considerati quattro intervalli di periodo proprio T ottenendo quattro valori di intensità spettrale:

	T₁	T₂
SA1	0,1 s	0,5 s
SA2	0,4 s	0,8 s
SA3	0,7 s	1,1 s
SA4*	0,5 s	1,5 s

- intensità spettrale $SI = \int_{T_1}^{T_2} V(T, \zeta) dT$

dove V è lo spettro di risposta in velocità, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento³; sono stati considerati tre intervalli di periodo proprio T ottenendo tre valori di intensità spettrale:

	T₁	T₂
SI1	0,1 s	0,5 s
SI2	0,5 s	1,0 s
SI3*	0,5 s	1,5 s

*I fattori di amplificazione SA4 e SI3 sono richiesti per studi in aree di pianura e di costa.

N.B.: nei casi di diminuzione dei fattori di amplificazione per bassi valori di V_{SH} o V_{S30} , causata da un significativo comportamento non lineare dei suoli, i valori riportati nelle tabelle sono mantenuti ancorati ai valori di amplificazione massima.

¹ PGA/PGA₀; PGA₀ è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 al suolo di riferimento, PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 alla superficie del sito.

² SA/SA₀; SA₀ è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento, SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito.

³ SI/SI₀; SI₀ è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento, SI è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito.

A2.1.1 - APPENNINO

Le tabelle relative al settore appenninico sono il riferimento per la stima semplificata dell'amplificazione stratigrafica nelle aree collinari e montane dell'Emilia-Romagna. Possono essere applicate anche nelle aree di pianura prossime al margine morfologico appenninico-padano dove le coperture detritiche continentali hanno spessore indicativamente non superiore a 50 m.

In caso di **coperture direttamente poggianti su substrato rigido**, ovvero *bedrock* sismico, generalmente caratterizzato da $V_s \geq 800$ m/s, si devono usare le seguenti tabelle

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,8	1,7	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,0	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
15	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,0
20	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,0
25	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,6	1,5	1,3	1,0
30		1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2
35		1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2
40		1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2
50		1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,4	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,7	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,1	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,2	2,2	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
20	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
25	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1
30		2,2	2,2	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2
35		2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,2
50		2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5	1,2

Fattore di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

Appennino, coperture su substrato rigido

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,5	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,2	1,8	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,8	2,5	1,9	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,9	2,8	2,4	1,7	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
30		3,0	2,7	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
35		3,1	2,9	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1
40		3,1	3,0	2,6	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
50		2,9	2,9	2,7	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,0	1,5	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,7	1,9	1,5	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
30		2,5	1,8	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
35		3,1	2,3	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
40		3,4	2,9	1,9	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0
50		3,5	3,3	2,8	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1

Fattore di Amplificazione **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)

Appennino, coperture su substrato rigido

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,5	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,1	2,0	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,4	2,3	2,1	1,7	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0
20	2,4	2,4	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0
25	2,4	2,4	2,4	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0
30		2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	1,1
35		2,3	2,3	2,3	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2
50		2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3

Fattore di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,6	1,9	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,9	2,5	1,9	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
30		2,9	2,3	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
35		3,2	2,8	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0
40		3,4	3,1	2,4	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0
50		3,2	3,2	2,9	2,2	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1

Fattore di Amplificazione **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

In caso di **coperture su substrato non rigido**, vale a dire caratterizzato da $V_s \ll 800$ m/s, si devono usare le seguenti tabelle

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2,3	2,0	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	
10	2,3	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2	
15	2,2	2,2	2,1	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	
20	2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2	
25	2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	
30		2,1	2,1	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	
35		2,1	2,1	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2
40		2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2
50		1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2,2	1,8	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	
10	2,5	2,3	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	
15	2,5	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2	
20	2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	1,3	
25	2,4	2,4	2,3	2,2	2,0	1,7	1,6	1,4	1,3	
30		2,3	2,3	2,2	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	
35		2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
50		2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **SAI** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

Appennino, coperture su substrato non rigido

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,6	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	
10	2,3	1,8	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	
15	2,8	2,3	1,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	
20	3,2	2,9	2,3	1,8	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	
25	3,4	3,2	2,7	2,0	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	
30		3,3	2,9	2,3	1,9	1,6	1,5	1,4	1,4	
35		3,3	3,0	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2
40		3,2	3,1	2,7	2,3	2,0	1,7	1,5	1,4	1,2
50		3,0	3,0	2,8	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3

Fattore di Amplificazione **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
10	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
15	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
20	2,4	2,1	1,6	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	
25	3,4	2,5	1,9	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	
30		3,0	2,3	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	
35		3,3	2,7	1,9	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,1
40		3,6	3,1	2,2	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2
50		3,6	3,4	2,9	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)

Appennino, coperture su substrato non rigido

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2,1	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	
10	2,6	2,3	1,9	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	
15	2,7	2,6	2,3	1,9	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	
20	2,6	2,6	2,4	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	
25	2,6	2,6	2,5	2,3	2,0	1,7	1,6	1,4	1,3	
30		2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	
35		2,4	2,4	2,3	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2
50		2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3

Fattore di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
10	1,8	1,6	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	
15	2,3	1,9	1,6	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	
20	2,9	2,6	1,9	1,6	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	
25	3,6	3,0	2,3	1,7	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	
30		3,3	2,7	1,9	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	
35		3,5	3,0	2,2	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1
40		3,5	3,2	2,6	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2
50		3,3	3,3	3,0	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3

Fattore di Amplificazione **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

In caso di **substrato marino non rigido**, cioè caratterizzato da $V_s \ll 800$ m/s, **affiorante** o **subaffiorante** (copertura di spessore inferiore a 3 m) si devono usare le seguenti tabelle

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
PGA					1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
SA1					1,9	1,7	1,6	1,4	1,2	1,1
SA2					1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3
SA3					1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
SI1					1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2
SI2					1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

A2.1.2 - PIANURA PADANA E COSTA ADRIATICA

Per la pianura e la costa sono stati individuati diversi ambienti caratterizzati da differenti caratteristiche litostratigrafiche, in particolare da diversa profondità dell'orizzonte che costituisce il substrato rigido, che in pianura non sempre coincide con l'orizzonte caratterizzato da $V_s \geq 800$ m/s.

PIANURA 1: settore di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di un'importante discontinuità stratigrafica responsabile di un contrasto di impedenza significativo, tale da essere considerato coincidente con il tetto del substrato rigido, a profondità ≤ 100 m da p.c.;

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,6	2,5	2,4	2,2	2,0	1,9
SA3	3,2	3,2	3,0	2,7	2,5	2,2
SA4	3,1	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,5
SI2	3,0	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1
SI3	3,4	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

PIANURA 2: settore di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. e dal tetto del substrato rigido a circa 150 m da p.c.;

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,7	2,7	2,4	2,1	1,9	1,8
SA3	3,3	3,2	2,8	2,5	2,3	2,1
SA4	3,3	3,1	2,7	2,4	2,1	1,9

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	3,1	3,0	2,7	2,4	2,1	2,0
SI3	3,6	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

PIANURA 3: settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti prevalentemente fini e poco consolidati, alternanze di limi, argille e sabbie di ambiente alluvionale e transizionale, con substrato rigido a profondità non inferiore a 300 m da p.c.;

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,3	1,3	1,3			

Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,3	1,3	1,3			
SA2	2,1	2,1	2,0			
SA3	2,5	2,5	2,4			
SA4	2,4	2,4	2,3			

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,5	1,5	1,5			
SI2	2,3	2,3	2,2			
SI3	2,6	2,6	2,4			

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

MARGINE: settore di transizione tra la zona collinare (Appennino) e la pianura, o la costa, caratterizzato da terreni alluvionali prevalentemente fini (argille, limi, sabbie) sovrastanti orizzonti grossolani (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose); il substrato geologico è generalmente costituito da sabbie marine o transizionali pleistoceniche (Sabbie Gialle) o dalla successione pelitica plio-pleistocenica (Argille Azzurre); il tetto del substrato geologico è a profondità indicativamente comprese tra 50 e 100 m; questo settore è suddiviso in:

MARGINE di tipo A: caratterizzato da terreni fini o grossolani poco consolidati, di spessore non superiore a 30 m, sovrastanti orizzonti prevalentemente grossolani a comportamento più rigido (indicativamente con valore di V_s media almeno doppio rispetto a quello dei sedimenti sovrastanti); H è riferito allo spessore di sedimenti fini o grossolani poco consolidati sovrastanti i sedimenti continentali più rigidi

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,1	1,8	1,5		
10	2,3	2,2	2,0	1,8		
15	2,1	2,1	2,0	1,8		
20	2,1	2,1	2,0	1,9		
25	2,0	2,0	2,0	1,9		
30	1,9	1,9	1,9	1,9		

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,0	1,7	1,5		
10	2,5	2,3	2,0	1,8		
15	2,4	2,4	2,1	1,9		
20	2,3	2,3	2,1	2,0		
25	2,2	2,2	2,1	2,0		
30	2,0	2,0	2,0	1,9		

Fattore di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

Margine A

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,9	1,7	1,7	1,6		
10	2,7	2,2	1,9	1,8		
15	3,3	2,9	2,3	2,0		
20	3,4	3,1	2,6	2,2		
25	3,3	3,2	2,8	2,4		
30	3,1	3,1	2,8	2,5		

Fattore di Amplificazione **SA2**($0,4s \leq T \leq 0,8s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,6	1,6	1,6	1,6		
10	2,0	1,8	1,7	1,7		
15	2,9	2,3	2,0	1,9		
20	3,4	2,8	2,3	2,0		
25	3,9	3,4	2,7	2,3		
30	3,8	3,6	3,0	2,5		

Fattore di Amplificazione **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)

Margine A

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,2	1,9	1,7	1,6		
10	2,6	2,4	2,0	1,8		
15	2,6	2,5	2,2	1,9		
20	2,5	2,5	2,3	2,0		
25	2,3	2,3	2,2	2,1		
30	2,1	2,1	2,1	2,0		

Fattore di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,8	1,7	1,6	1,6		
10	2,3	2,0	1,8	1,7		
15	3,2	2,6	2,1	2,0		
20	3,5	3,1	2,5	2,1		
25	3,7	3,4	2,8	2,4		
30	3,6	3,5	3,0	2,6		

Fattore di Amplificazione **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

MARGINE di tipo B: caratterizzato da spessore dei terreni superficiali fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 m; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini;

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5
SA2	2,6	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7
SA3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2,1
SA4	3,0	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$) e **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1	2,0
SI3	3,3	3,1	2,7	2,4	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

A2.2 - Effetti della topografia

Gli effetti topografici possono essere trascurati per pendii con inclinazione media inferiore a 15° . Devono essere calcolati nel caso di configurazioni geometriche bidimensionali e tridimensionali (cocuzzolo, cresta, dorsale allungata) di altezza (H) superiore a 30 m. Per pendii con inclinazione maggiore di 15° la risposta sismica locale deve essere incrementata di un fattore S_T (coefficiente di amplificazione topografica) che può essere calcolato nel seguente modo (figura 1):

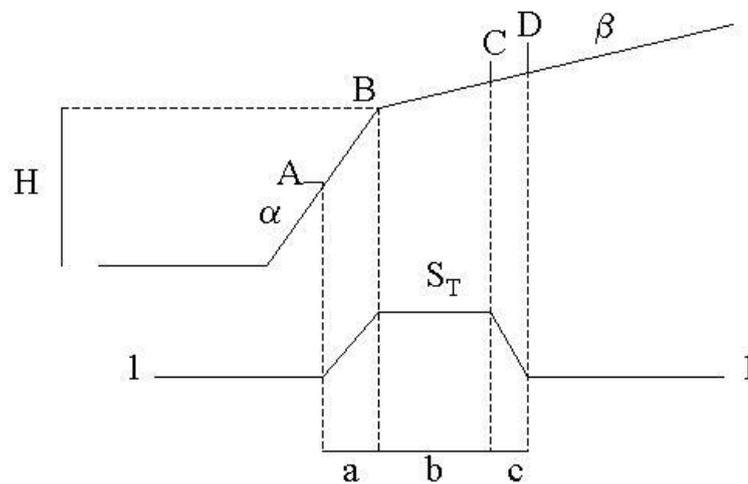


Figura 1

$S_T = 1 + 0.8(\alpha - \beta - 0.4)$ sul segmento BC

b: valore minimo tra 20α e $\frac{H+10}{4}$

α e β sono i gradienti della parte più ripida e meno ripida, rispettivamente:

$S_T = 1$ in A ($a = H/3$) e $S_T = 1$ in D ($c = H/4$)

S_T : si impone comunque un valore compreso tra 1 e 1,4.

ALLEGATO A3

PROCEDURE DI RIFERIMENTO PER LE ANALISI DI TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO**A) Valutazione della possibilità di occorrenza della liquefazione**

Nell'ipotesi che il caso in esame non rientri tra quelli di seguito elencati (v. par. A1) per cui è possibile escludere l'occorrenza di fenomeni di liquefazione, nelle analisi di terzo livello il rischio di liquefazione deve essere accertato in base alla possibilità di concomitanza di fattori scatenanti (caratteristiche dei terremoti attesi) e predisponenti (susceptibilità dei terreni).

La susceptibilità del terreno alla liquefazione deve essere valutata sulla base di prove in sito (CPT, SPT, DMT e prove geofisiche atte a determinare il profilo di velocità delle onde di taglio Vs, in particolare prove DH, CH, SCPT e SDMT) e prove di laboratorio (distribuzione granulometrica, limiti di Atterberg e proprietà fisiche ritenute significative in base al grado di disturbo dei campioni) esplorando un numero di verticali adeguato all'estensione dell'area e alla variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del deposito. Deve anche essere determinata con appropriate rilevazioni l'entità delle fluttuazioni dei livelli di falda e nelle analisi si deve considerare la condizione più gravosa.

La stima del potenziale di liquefazione può essere effettuata in condizioni "free-field" con i "metodi semplificati" di seguito specificati, e a tal fine per ogni verticale deve essere valutato il picco di accelerazione massima in superficie $a_{max\ s}$ mediante analisi della risposta locale sotto l'azione sismica di riferimento. L'analisi di risposta sismica locale può essere omessa se nell'area sono stati già eseguiti studi di microzonazione sismica di II livello che forniscano i valori di $a_{max\ s}$ nel sito.

I risultati dello studio devono essere presentati riportando l'andamento del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione $F_L(z)$ per ciascuna delle verticali esplorate fino alla profondità critica z_{crit} da piano campagna (di norma si assume $z_{crit} = 20m$), o fino alla profondità oltre la quale si esclude l'occorrenza di liquefazione. Per ogni verticale deve anche essere valutato l'indice del potenziale di liquefazione I_L di seguito definito. In base al valore stimato dell'indice del potenziale di liquefazione I_L si definiscono le seguenti classi di pericolosità (Sonmez, 2003):

$I_L = 0$	Non liquefacibile ($F_L \geq 1.2$)
$0 < I_L \leq 2$	Potenziale basso
$2 < I_L \leq 5$	Potenziale moderato
$5 < I_L \leq 15$	Potenziale alto
$15 < I_L$	Potenziale molto alto

I risultati devono essere riportati in una carta di microzonazione del rischio di liquefazione ove, oltre alla perimetrazione delle zone dell'area in studio, devono essere localizzate le verticali esplorate ed a ciascuna di esse deve essere associato il valore calcolato dell'indice del potenziale di liquefazione, I_L .

Nel caso che i terreni risultino liquefacibili o suscettibili di significativi incrementi delle pressioni interstiziali durante l'evento sismico di riferimento devono esserne valutati gli effetti in termini di cedimenti permanenti post-sismici seguendo le indicazioni del paragrafo B).

A1. CASI IN CUI SI PUÒ OMETTERE LA VERIFICA A LIQUEFAZIONE

La probabilità che si manifestino fenomeni di liquefazione è bassa o nulla se è verificata almeno una delle seguenti condizioni:

1. Magnitudo attesa inferiore a 5;
2. Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field minore di 0.1g;
3. Terreni sabbiosi con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:
 - frazione di fine¹, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità $I_p > 10\%$;
 - $FC \geq 35\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 20$ oppure $q_{c1N} > 120$ oppure $V_{S1} > 200$ m/s;
 - $FC \leq 5\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 160$ oppure $V_{S1} > 220$ m/s

$(N_1)_{60}$, q_{c1N} , V_{S1} sono i valori normalizzati dell'indice N_{SPT} della Standard Penetration Test, della resistenza di punta q_c della prova CPT e della velocità di propagazione delle onde di taglio da prove geofisiche. In prima approssimazione tali valori possono essere calcolati con le seguenti equazioni:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$q_{c1N} = \frac{q_c}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$V_{S1} = V_S \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

essendo p_a la pressione atmosferica e σ'_{v0} la pressione efficace litostatica verticale.

4. Distribuzione granulometrica esterna per oltre il 50% al fuso indicato in Figura 1a nel caso di materiale con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in Figura 1b per coefficienti di uniformità $U_c > 3.5$.
5. Profondità media stagionale della falda superiore ai 15 m dal piano campagna.

¹ La frazione di fine è definita come la frazione passante al setaccio 200 ASTM (0.074 mm) e può essere determinata con misure dirette in laboratorio o mediante relazioni empiriche.

A2. METODI SEMPLIFICATI DI STIMA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

Per verificare la possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione possono essere impiegate le procedure che nell'Ingegneria Geotecnica Sismica sono denominate 'metodi semplificati'. Tali metodi, applicabili solo nelle condizioni di piano di campagna orizzontale o con deboli pendenze e depositi olocenici, richiedono la valutazione, fino alla profondità critica da p.c., del coefficiente di sicurezza:

$$F_L(z) = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad \text{ove:}$$

$$CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm} = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_{v0}} \quad \text{è il rapporto di resistenza ciclica, ovvero la resistenza normalizzata}$$

rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0} , per terremoto di magnitudo $M = 7.5$ e pressione efficace di riferimento $\sigma'_v = 1atm$

MSF è il fattore di scala della Magnitudo che è funzione, oltre che del valore della magnitudo dell'azione sismica di riferimento, anche del metodo di stima di CRR ,

K_σ è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d \quad \text{è il rapporto di tensione ciclica, ovvero la tensione di}$$

taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0} , ove a_{maxs} è il picco di accelerazione al piano campagna, g è l'accelerazione di gravità, σ_{v0} e σ'_{v0} sono le tensioni verticali rispettivamente totale e efficace alla profondità considerata, ed r_d è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica per effetto della deformabilità del terreno che può essere stimato con relazioni empiriche associate ai diversi metodi di stima di CRR (e di MSF). Il valore della tensione tangenziale media $\tau_{media} = 0.65 \tau_{max}$ al variare della profondità può essere più precisamente determinato con analisi di risposta sismica locale.

Alcuni dei metodi semplificati che possono essere utilizzati per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna sono di seguito descritti, con riferimento alle diverse tipologie di prove in sito (SPT, CPT elettriche, DMT) e al profilo di V_s . La procedura consigliata per ciascun tipo di prova, scelta tra quelle più recenti e ritenute affidabili, deve essere applicata seguendo i passi nell'ordine indicato.

Tra i metodi semplificati di stima del potenziale di liquefazione è da preferire quello basato sui risultati di prove CPT elettriche (CPTe/CPTu).

Il contenuto di fine FC, richiesto per l'applicazione dei vari metodi, può essere determinato con misure dirette in laboratorio e/o mediante relazioni empiriche.

A2.1 Metodo basato sui risultati di prove SPT (Boulangier e Idriss, 2014)

$$1. (N_1)_{60} = C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \cdot N_{SPT} \leq 46$$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^m \leq 1.7$$

$$m = 0.784 - 0.0768 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad \text{con } (N_1)_{60cs} \leq 46$$

[(N₁)_{60cs} è definito al punto 2 e m è determinato per via iterativa; per prove eseguite secondo le raccomandazioni AGI (1977): C_E = C_B = C_R = C_S ≅ 1; p_a è la pressione atmosferica]

$$2. (N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left[1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01} \right)^2 \right]$$

(FC è il contenuto di fine espresso in %, determinato con analisi granulometrica sul materiale prelevato durante l'esecuzione della prova medesima e/o mediante stima indiretta da prove CPTe/CPTu limitrofe)

$$3. CRR_{M=7.5; \sigma'_{v}=latm} = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right\}$$

$$4. MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \cdot \left[8.64 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 1.325 \right]$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right)^3 \leq 2.2$$

$$5. K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_{v}}{p_a} \right) \leq 1.0$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3$$

$$6. CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \text{sen} \left(\frac{z}{11.73} + 5.133 \right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \text{sen} \left(\frac{z}{11.28} + 5.142 \right)$$

$$7. F_L = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_{v}=latm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

Nelle equazioni precedenti M è la magnitudo momento del terremoto di riferimento.

La curva CRR – (N₁)_{60cs} è mostrata in Figura 2a.

A.2.2 Metodo basato sui risultati di prove CPTe/CPTu (Boulanger e Idriss, 2014)

Tutti i metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione che utilizzano i risultati di prove penetrometriche statiche sono calibrati sull'apparecchiatura a punta elettrica (CPTe/CPTu). L'uso di tali metodi con i risultati di prove CPT a punta meccanica può condurre ad una sovrastima della resistenza CRR e quindi del fattore di sicurezza.

$$1. q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{p_a}$$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^m \leq 1.7$$

$$m = 1.338 - 0.249 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264} \quad \text{con } 21 \leq q_{c1Ncs} \leq 254$$

(q_{c1Ncs} è definito al punto 2 e m è determinato per via iterativa; p_a è la pressione atmosferica)

$$2. q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \cdot \exp \left[1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right]$$

FC è il contenuto di fine espresso in %. In assenza di dati specifici per il sito, FC può essere stimato con l'espressione empirica²:

$$FC = 80 I_c - 137$$

in cui I_c è l'indice di classificazione del terreno da prova CPT proposto da Robertson (1990):

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q_n - 3.47)^2}$$

con

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma'_{v0}} \cdot 100$$

$$Q_n = \left(\frac{q_c - \sigma'_{v0}}{p_a} \right) \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^m$$

$$3. CRR = \exp \left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right]$$

$$4. MSF = 1 + (MSF \left[8.64 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 1.325 \right])_{max}$$

$$MSF \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180} \right)_{max}^3$$

² L'espressione deriva dalla seguente correlazione tra I_c e FC proposta da Boulanger e Idriss (2014):

$I_c = [(FC+137)/80] - C_{FC}$ dove $(-C_{FC})$ è l'errore che, per il set di dati utilizzato dagli Autori, presenta media nulla e deviazione standard 0.29.

Qualora si disponga di dati specifici per il sito, il parametro C_{FC} può essere appositamente calibrato mantenendo la stessa forma funzionale (lineare) della suddetta correlazione, o forme funzionali differenti.

In mancanza di dati specifici per il sito, è lecito invece determinare FC dalla curva di regressione media ottenuta da Boulanger e Idriss (2014), ovvero assumere nella suddetta correlazione $C_{FC}=0$.

$$5. K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.0$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$$

$$6. CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{vn}} \cdot r_d$$

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \text{sen}\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \text{sen}\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

$$7. F_L = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma_v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

Nelle equazioni precedenti M è la magnitudo momento del terremoto di riferimento.

La curva CRR – q_{c1Ncs} è mostrata in Figura 2b.

A2.3 Metodo basato sui risultati di prove DMT (Marchetti, 2013)

$$1. CRR = \exp \left[(Q_{cn} / 540) + (Q_{cn} / 67)^2 - (Q_{cn} / 80)^3 + (Q_{cn} / 114)^4 - 3 \right]$$

$$\text{con } Q_{cn} \cong 25K_D$$

$$2. MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

$$3. CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \cdot r_d$$

$$r_d = \frac{1 - 0.4113 \cdot z^{0.5} + 0.04052 \cdot z + 0.001753 \cdot z^{1.5}}{1 - 0.4177 \cdot z^{0.5} + 0.05729 \cdot z - 0.006205 \cdot z^{1.5} + 0.001210 \cdot z^2} \leq 1$$

$$4. F_L = \frac{CRR_{M=7.5}}{CSR} \cdot MSF$$

La curva CRR in funzione di Q_{cn} e K_D (da Marchetti, 2015) è mostrata in Figura 2c.

A2.4 Metodo basato sui profili di velocità delle onde di taglio V_s (Andrus e Stokoe, 2000)

Il metodo è stato tarato ed è applicabile a sabbie non cementate, oloceniche, di età inferiore a 10.000 anni

$$1. V_{S1} = V_S \cdot C_V$$

$$C_V = \left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}} \right)^{0.25} \leq 1.4$$

$$2. CRR = 0.022 \cdot \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 \cdot \left(\frac{1}{V_{S1}^* - V_{S1}} - \frac{1}{V_{S1}^*} \right)$$

$$FC \leq 5\% \Rightarrow V_{S1}^* = 215 \text{ m/s}$$

$$5\% < FC < 35\% \Rightarrow V_{S1}^* = 215 - 0.5 \cdot (FC - 5)$$

$$FC \geq 35\% \Rightarrow V_{S1}^* = 200 \text{ m/s}$$

$$3. MSF = 6.9 \exp \left(-\frac{M}{4} \right) - 0.06 \quad \text{per } M > 5.2$$

$$MSF = 1.82 \quad \text{per } M \leq 5.2$$

$$4. CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \cdot r_d$$

$$r_d = \exp [\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \text{sen} \left(\frac{z}{11.73} + 5.133 \right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \text{sen} \left(\frac{z}{11.28} + 5.142 \right)$$

$$5. F_L = \frac{CRR_{M=7.5}}{CSR} \cdot MSF$$

Nelle equazioni precedenti M è la magnitudo momento del terremoto di riferimento.

La curva CRR – V_{S1} è mostrata in Figura 2d.

A3. DEFINIZIONE E CALCOLO DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

L'indice del potenziale di liquefazione, I_L , è definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad \text{in cui} \quad w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}}\right)$$

z_{crit} è la profondità critica, ovvero la profondità massima entro la quale può verificarsi la liquefazione, che di norma si assume pari a 20 m.

La variabile $F(z)$ vale (Sonmez, 2003):

$F(z) = 0$	per	$F_L \geq 1.2$
$F(z) = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L)$	per	$1.2 > F_L \geq 0.95$
$F(z) = 1 - F_L$	per	$F_L \leq 0.95$

B) Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica

La stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica è affetta da notevoli incertezze. I valori che si ottengono applicando le procedure nel seguito descritte devono intendersi solo orientativi.

Per cedimento si intende l'abbassamento del piano campagna, ovvero l'integrale della deformazione del terreno in direzione verticale, o anche la sommatoria dei prodotti della deformazione verticale media per lo spessore di ciascuno degli strati deformati. In condizioni edometriche, ovvero in presenza di strati di terreno orizzontali ed omogenei, e con tensione costante in direzione orizzontale, le deformazioni laterali sono nulle e pertanto la deformazione verticale coincide con la deformazione volumetrica. Per semplicità e con approssimazione accettabile, salvo casi di morfologia con forti pendenze e stratigrafie molto variabili in direzione orizzontale, per la stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica si può fare riferimento alle condizioni edometriche. Il cedimento permanente indotto dall'azione sismica in corrispondenza di una verticale di esplorazione si ottiene dalla somma dei contributi al cedimento stimati per i diversi strati del sottosuolo, fino alla profondità alla quale tali contributi non sono più significativi. Il cedimento permanente post-sismico può dunque essere

stimato con l'equazione: $s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i$ in cui ε_{vi} è la deformazione volumetrica (e verticale)

dello strato i-esimo e Δz_i il suo spessore.

I cedimenti permanenti indotti dall'azione sismica possono essere dovuti alle deformazioni volumetriche (e quindi verticali) di:

- B1. terreni granulari saturi,
- B2. terreni granulari insaturi,
- B3. terreni coesivi soffici.

I cedimenti conseguenti a liquefazione di terreni granulari saturi hanno luogo immediatamente dopo il terremoto o comunque in un tempo non superiore a un giorno, i cedimenti per densificazione di terreni granulari insaturi avvengono durante lo scuotimento sismico, mentre i cedimenti per consolidazione di terreni coesivi soffici possono richiedere tempi anche molto lunghi in funzione delle condizioni stratigrafiche e geotecniche.

I risultati devono essere riportati in una carta di microzonazione dei cedimenti indotti dall'azione sismica ove, oltre alla perimetrazione delle zone dell'area in studio, devono essere localizzate le verticali esplorate ed a ciascuna di esse deve essere associato il valore del cedimento totale stimato. Qualora il cedimento totale sia dovuto a più di uno dei meccanismi in precedenza elencati, dovrà essere specificato il valore di ciascuno dei tre contributi.

Sono nel seguito descritti alcuni metodi di stima dei cedimenti basati sui risultati di prove in sito e/o di laboratorio.

B1. Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni granulari saturi

La deformazione volumetrica (e verticale) ε_v nei terreni granulari saturi può essere stimata da prove CPT in funzione della resistenza penetrometrica di punta normalizzata e corretta, $(q_{c1N})_{cs}$ e del coefficiente di sicurezza alla liquefazione F_L con il grafico di Figura 3a (Zhang et al., 2002), e da prove SPT in funzione della resistenza SPT normalizzata e corretta $(N_1)_{60,cs}$ e del rapporto di tensione ciclica CSR con il grafico di Figura 3b (Wu e Seed, 2004). Il cedimento post-sismico per ciascuno strato è dato da: $\Delta s_i = \varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i$.

In alternativa, la deformazione volumetrica, ε_v (espressa in decimali), può essere stimata mediante le seguenti espressioni (Idriss e Boulanger, 2008):

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp \left(2.551 - 1.147 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264} \right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max}) \quad \text{con } q_{c1Ncs} \geq 21$$

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp \left(-0.369 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}} \right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max})$$

in cui γ_{max} (decimale) è la massima deformazione di taglio indotta dall'azione sismica, determinabile, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma_{max} = \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

dove r_d può essere determinato con l'equazione riportata nel §A.2.1 e G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidità iniziale $G_0 (= \rho \cdot V_s^2)$, utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche in laboratorio o, in modo approssimato, desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4 da AGI, 2005).

B2. Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni granulari insaturi

Il cedimento indotto dall'azione sismica nei terreni granulari insaturi può essere stimato dai risultati di prove SPT con il metodo di Pradel (1998), nel modo seguente:

$\Delta s = 2 \Delta z \cdot \varepsilon_{Nc}$ in cui Δs è il cedimento dello strato di spessore Δz ,

$\varepsilon_{Nc} = \varepsilon_{15} \cdot \left(\frac{N_c}{15} \right)^{0.45}$ è la deformazione volumetrica per un numero di cicli equivalente del terremoto N_c il cui valore è funzione della magnitudo momento secondo l'equazione: $N_c = (M - 4)^{2.17}$

$\varepsilon_{15} = \gamma \cdot \left(\frac{(N_1)_{60}}{20} \right)^{-1.2}$ è la deformazione volumetrica dopo 15 cicli di ampiezza γ ,

$(N_1)_{60}$ è il numero di colpi della prova SPT normalizzato alla pressione atmosferica, e γ è la deformazione di taglio media indotta dall'azione sismica.

Quest'ultima può essere determinata, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma = 0.65 \cdot \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

dove $r_d = 1/[1+(z/30.5)^2]$ con z in metri.

G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidità iniziale $G_0 (= \rho \cdot V_s^2)$, utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche in laboratorio o, in modo approssimato,

desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4 da AGI, 2005).

In alternativa la deformazione di taglio media indotta dall'azione sismica può essere stimata con la relazione empirica (Pradel, 1998):

$$\gamma = \left(\frac{1 + a \cdot e^b \cdot \frac{\tau_{\text{media}}}{G_0}}{1 + a} \right) \quad \text{in cui:} \quad \tau_{\text{media}} = 0.65 \cdot \frac{a_{\text{maxs}}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d$$

dove $r_d = 1/[1+(z/30.5)^2]$ (z in metri).

G_0 è il modulo di taglio iniziale, che può essere determinato con la relazione $G_0 = \rho \cdot V_S^2$ o stimato in prima approssimazione con relazioni empiriche in funzione dei risultati di prove in sito (ad es. SPT, CPT, etc).

$$a = 0.0389 \cdot \left(\frac{p'_0}{p_a} \right) + 0.124$$

$$b = 6400 \cdot \left(\frac{p'_0}{p_a} \right)^{-0.6}$$

Ove p_a è la pressione atmosferica e p'_0 è la pressione media efficace alla profondità considerata

$$p'_0 = \left(\frac{1 + 2k_0}{3} \right) \cdot \sigma'_{v0}$$

In mancanza di determinazione sperimentale si può assumere per il coefficiente di spinta a riposo k_0 il valore 0.5.

B3. Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni coesivi soffici

Nei depositi coesivi soffici ($c_u \leq 70\text{kPa}$; $V_S < 180\text{m/s}$) e plastici ($I_p \geq 30\%$), in cui si prevede un incremento delle pressioni interstiziali $\frac{\Delta u}{p_0} \geq 0.3$ durante l'azione sismica di

riferimento, la deformazione volumetrica (e verticale) e quindi l'entità del cedimento di riconsolidazione conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto può essere stimata con l'equazione (Yasuhara e Andersen, 1991):

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p_0}} \right) \quad \text{in cui}$$

C_r è l'indice di ricomprensione, che si assume pari all'indice di rigonfiamento C_s , determinabile con prova edometrica,

$\alpha = 1.5$ è un coefficiente empirico che tiene conto della particolare storia di carico ciclico,

e_0 è l'indice dei vuoti naturale in sito dell'argilla,

$\frac{\Delta u}{p_0} = r_u$ è il rapporto fra l'incremento di pressione interstiziale indotta dallo scuotimento sismico e la tensione media efficace iniziale

Per la stima del rapporto di sovrappressione interstiziale può essere utilizzata la seguente relazione empirica (Matsui et al., 1980):

$$r_u = \frac{\Delta u}{p_0} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_v} \right] \quad \text{in cui}$$

$\beta \cong 0.45$ è un coefficiente sperimentale,

γ_{\max} è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, determinabile, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma_{\max} = \frac{a_{\max}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G} \quad \text{dove } r_d = 1 - 0.015z \quad (z \text{ in metri})$$

G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ_{\max} , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidezza iniziale $G_0 (= \rho \cdot V_s^2)$, utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche di laboratorio o, in modo approssimato, desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4 da AGI (2005))³.

γ_v è la deformazione di soglia volumetrica, determinabile con prove dinamiche di laboratorio, o in prima approssimazione con la relazione empirica (Matsui et al. 1980): $\gamma_v = A \cdot (OCR - 1) + B$ in cui OCR è il rapporto di sovraconsolidazione e A e B sono coefficienti sperimentali che, in assenza di determinazione diretta, possono essere stimati in funzione dell'indice di plasticità, I_p (Tabella 1).

Tabella 1 - Valori suggeriti per i coefficienti A e B

I_p (%)	A	B
20	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-3}$
40	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
55	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

³ Il valore della deformazione di taglio massima γ_{\max} al variare della profondità può essere più precisamente determinato con analisi di risposta sismica locale.

C) Identificazione dei pendii potenzialmente instabili

La valutazione del rischio di instabilità di pendii naturali e artificiali al III livello deve essere condotta con rilievi geologici molto più approfonditi rispetto al II livello.

La scelta dei metodi di controllo della stabilità dei pendii deve essere commisurata alla gravità delle conseguenze di un eventuale collasso e, in generale, devono essere effettuate anche prove dinamiche in sito e di laboratorio che consentano una accurata caratterizzazione dei terreni in campo dinamico e l'identificazione dei fenomeni associati al terremoto (amplificazione della risposta sismica, liquefazione, decadimento della resistenza) che possono aggravare, in aggiunta alle forze inerziali, le condizioni di stabilità del pendio. I metodi di verifica devono essere scelti tra quelli della Geotecnica Sismica ritenuti più affidabili e consolidati, e dovranno essere inclusivi dell'analisi della risposta sismica locale e degli effetti topografici.

Nel caso di frane attive, particolare attenzione deve essere data alla perimetrazione dell'area in frana, alla identificazione dei volumi potenzialmente instabili in condizioni sismiche⁴, al controllo dell'entità e della velocità dei movimenti, alla distribuzione delle pressioni interstiziali, alla valutazione dei parametri di resistenza residui ed agli effetti conseguenti ad una accelerazione dei movimenti in condizioni sismiche.

Ai fini del controllo della stabilità si distinguono le seguenti situazioni:

- a) il caso in cui nell'ammasso siano presenti materiali liquefacibili;
- b) il caso in cui lo scorrimento avvenga lungo una specifica superficie (nota o da individuare).

Caso a - Deve essere valutato il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione F_L negli strati liquefacibili (vedi paragrafo A). Il valore ottenuto deve essere corretto moltiplicandolo per un fattore di correzione K_α che dipende:

dal rapporto α fra la tensione di taglio iniziale agente sul piano di interesse e la tensione verticale efficace iniziale:

$$\alpha = \frac{\tau_{st}}{\sigma_{v0}}$$

e da un parametro di stato relativo:

$$\xi_R = \frac{1}{Q - \ln\left(\frac{100 \cdot p_0'}{p_a}\right)} - D_R$$

in cui Q è una costante empirica che per sabbie quarzose vale circa 10, p_0' è la pressione media efficace iniziale e D_R è la densità relativa della sabbia.

Il fattore di correzione K_α è calcolato con la seguente relazione (Idriss e Boulanger, 2008):

$$K_\alpha = a + b \cdot \exp\left(\frac{-\xi_R}{c}\right) \quad \text{in cui:}$$

$$a = 1267 + 636 \cdot \alpha^2 - 634 \cdot \exp(\alpha) - 632 \cdot \exp(-\alpha)$$

$$b = \exp\left[-1.11 + 12.3 \cdot \alpha^2 + 1.31 \cdot \ln(\alpha + 0.0001)\right]$$

$$c = 0.138 + 0.126 \cdot \alpha + 2.52 \cdot \alpha^3$$

$$\text{valida per} \quad \alpha \leq 0.35 \quad \text{e} \quad -0.6 \leq \xi_R \leq 0.1$$

Se $F_L < 1.2$ il pendio è da considerarsi instabile.

Caso b - Il controllo della stabilità deve essere effettuato in tutti i casi in cui eventuali movimenti del pendio e/o il superamento di una certa soglia di deformazione in condizioni

⁴ È importante sottolineare che in condizioni sismiche i volumi di frana non sono uguali a quelli che si hanno in condizioni statiche

sismiche possono produrre effetti critici su strutture o infrastrutture poste sul pendio stesso o in aree adiacenti.

Devono essere preliminarmente identificati la geometria del pendio, la profondità del substrato, la stratigrafia, il regime delle pressioni interstiziali, le proprietà geotecniche dei terreni costituenti i vari strati, l'entità e la posizione di eventuali carichi esterni. Nel caso di frane attive o quiescenti devono essere individuati il cinematismo di frana e la forma della superficie di potenziale scorrimento.

Per l'identificazione di tali elementi devono essere condotti accurati rilievi geologici di superficie, indagini geotecniche in sito e di laboratorio e devono essere installati strumenti per il monitoraggio delle pressioni interstiziali e degli spostamenti.

Il numero minimo di verticali di indagine deve essere tale da permettere una descrizione accurata della successione stratigrafica dei terreni interessati da cinematismi di collasso effettivi o potenziali e, nel caso di pendii in frana, deve consentire di accertare forma e posizione della superficie, o delle superfici di scorrimento e definire i caratteri cinematici della frana. Le indagini devono essere estese oltre l'area direttamente interessata e devono avere una profondità superiore di alcuni metri al di sotto della superficie critica.

Devono essere effettuate analisi del pendio in condizioni statiche, sismiche e post-sismiche, ponendo particolare attenzione alla definizione delle caratteristiche di resistenza dei materiali, in condizioni drenate e non drenate. In particolare, si dovranno assumere:

- caratteristiche di resistenza corrispondenti alle condizioni di post-picco per terreni a comportamento fragile oppure corrispondenti alle condizioni di volume costante per terreni a comportamento duttile, nel caso di frane di primo distacco;
- caratteristiche di resistenza corrispondenti alle condizioni residue nel caso di frane attive o quiescenti e in presenza di scorrimenti elevati

con riferimento a:

- condizioni drenate nella situazione pre-sisma,
- condizioni non drenate durante il sisma,
- condizioni drenate nella situazione post-sisma.

Per le verifiche sotto carico sismico, in presenza di terreni saturi occorre effettuare una stima del rapporto di pressione interstiziale r_u in corrispondenza di alcune verticali significative e a varie profondità.

Nel caso di terreni coesivi saturi, il rapporto di pressione interstiziale può essere valutato in modo approssimato mediante la relazione empirica di Matsui (1980) riportata nel paragrafo

B3. Se il rapporto di pressione interstiziale al termine del sisma è $r_u = \frac{\Delta u}{p_0} > 0.5$ occorre

valutare il decremento della resistenza non drenata con l'espressione (Matasovic, 1993):

$$\frac{c_u}{\sigma'_{v0}} = \frac{c_{u0}}{\sigma'_{v0}} \sqrt{\frac{\sigma'_{v0} - \Delta u}{\sigma'_{v0}}} \cong \frac{c_{u0}}{\sigma'_{v0}} \sqrt{1 - r_u}$$

ove c_{u0} è la coesione non drenata in condizioni statiche e σ'_{v0} la pressione efficace verticale.

Nel caso in cui sia $r_u < 0.5$ il decremento di resistenza è legato prevalentemente alla fatica del materiale per effetto delle azioni cicliche indotte dal terremoto e può essere valutato con l'espressione (Matasovic, 1993):

$$c_u(N) = c_{u0} \cdot \delta = c_{u0} \cdot N^{-t}$$

dove δ è il coefficiente di degradazione ciclica, N è il numero di cicli equivalenti del terremoto e t è il parametro di degradazione.

Il numero di cicli equivalenti del terremoto N può essere stimato in funzione della magnitudo come da Tabella 2 (Seed et al., 1975).

Tabella 2 – Numero di cicli equivalenti per terremoti di diversa magnitudo

Magnitudo M	Numero di cicli equivalente
5.25	2-3
6.0	5
6.5	8
7.0	12
7.5	15
8	20

Il parametro di degradazione t è funzione della deformazione di taglio, dell'indice di plasticità e del grado di sovraconsolidazione, e può essere stimato con la relazione (Matasovic, 1993):

$$t = s \cdot (\gamma - \gamma_v)^r \quad \text{in cui:}$$

$\gamma = 0.65 \gamma_{max}$ essendo γ_{max} la deformazione di taglio massima indotta dal terremoto, determinabile, in prima approssimazione, con la relazione empirica⁵:

$$\gamma_{max} = \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

già citata nel §B3

γ_v è la deformazione di soglia volumetrica, determinabile con prove dinamiche di laboratorio o, in prima approssimazione con la già citata relazione:

$$\gamma_v = A \cdot (OCR - 1) + B$$

s e r sono coefficienti funzione dell'indice di plasticità I_p e del rapporto di sovraconsolidazione OCR (Tabella 3)

Tabella 3 – Coefficienti per il calcolo dell'indice di degradazione ciclica

	OCR = 1			OCR = 2	OCR = 4
	$I_p = 15$	$I_p = 30$	$I_p = 50$	$I_p = 50$	$I_p = 50$
s	0.195	0.095	0.075	0.054	0.042
r	0.600	0.600	0.495	0.480	0.423

Nel caso di terreni sabbiosi o limosi saturi r_u può essere stimato in prima approssimazione mediante la seguente relazione empirica (Seed e Booker, 1977):

$$r_u = \frac{\Delta u}{p_0} = \frac{2}{\pi} \operatorname{sen}^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/2a} \right] \quad \text{con } a = 0.96 \cdot D_R^{0.83}$$

essendo D_R la densità relativa, $N=N_c$ il numero di cicli equivalente al sisma funzione della magnitudo M (Tabella 2) e N_L il numero di cicli che porta a liquefazione il terreno con un rapporto di sforzo ciclico pari a τ_{hv}/p'_0 , essendo p'_0 la pressione media efficace iniziale e $\tau_{hv}=\tau_{media}$ la tensione tangenziale media indotta dal sisma, stimabile in prima approssimazione mediante la relazione riportata nel §B2. N_L può essere determinato sperimentalmente mediante prove triassiali cicliche o di taglio semplice ciclico oppure stimato, in prima approssimazione, dal grafico di Figura 6.

⁵ Il valore della deformazione di taglio efficace $\gamma = 0.65 \gamma_{max}$ al variare della profondità può essere più precisamente determinato con analisi di risposta sismica locale.

Cl. Metodi pseudostatici

Le analisi di stabilità dei pendii possono essere condotte con metodi pseudostatici.

I metodi pseudostatici globali o per conci prevedono di applicare alla massa potenzialmente in frana o ad ogni concio un'azione sismica proporzionale al relativo peso W , di componenti orizzontale e verticale pari rispettivamente a $F_h = K_h \cdot W$ e $F_v = K_v \cdot W$, ove con K_h e K_v sono indicati rispettivamente i coefficienti sismici orizzontale e verticale.

I risultati sono espressi in termini di fattore di sicurezza F_s , rapporto tra azioni resistenti e azioni destabilizzanti lungo la superficie di scorrimento.

Si devono assumere i seguenti valori: $K_h = \beta_s \cdot a_{max} / g$, in direzione orizzontale, e $K_v = \pm 0.5 \cdot K_h$, in direzione verticale, essendo a_{max} l'accelerazione massima (in g) al piano campagna attesa al sito, β_s un coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima e g l'accelerazione di gravità. I valori di β_s sono riportati nella Tabella 4 in funzione della accelerazione orizzontale massima attesa al sito in condizioni di campo libero nell'ipotesi di sottosuolo rigido e superficie topografica orizzontale (a_g) e delle categorie di sottosuolo di riferimento così come definite nelle NTC 2018 (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018)

Tabella 4 – Valori del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima

	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0.2 < a_g/g < 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g/g < 0.2$	0.27	0.24
$a_g/g \leq 0.1$	0.20	0.20

Un valore del fattore di sicurezza $F_s = 1$ corrisponde ad una condizione di equilibrio limite o di collasso incipiente, mentre valori di $F_s > 1$ individuano condizioni caratterizzate da un certo margine di sicurezza rispetto al collasso. Un valore di $F_s > 1.2$ può essere ritenuto indicativo di una condizione di stabilità.

Nei pendii coesivi a comportamento duttile (indice di consistenza $I_c < 0.5$, grado di sovraconsolidazione $OCR < 5$, indice di plasticità $I_p > 26$) devono essere applicati anche metodi dinamici semplificati, effettuando stime approssimate degli spostamenti mediante integrazione diretta dell'equazione di moto a partire da una storia temporale di accelerazioni o ricorrendo a relazioni empiriche di letteratura⁶.

⁶ Vedi Linee Guida AGI, 2005, Appendice H. Per il calcolo dello spostamento nel caso di un pendio indefinito o di superficie di scorrimento piana si possono anche usare le seguenti espressioni empiriche, derivate dalla teoria del blocco rigido di Newmark:

$$S = S_0 \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\cos \phi}$$

in cui ϕ è l'angolo di resistenza al taglio sul piano di slittamento, α è l'angolo di inclinazione della superficie di scorrimento e S_0 è lo spostamento del blocco rigido sul piano orizzontale valutabile con la relazione:

$$S_0 = \frac{37 v_{max}^2}{a_{max}} e^{-9.4 \frac{a_c}{a_{max}}} \quad \text{ove}$$

a_{max} = accelerazione massima del moto alla base del pendio (in g)

v_{max} = velocità massima del moto alla base del pendio (cm/s)

$a_c = K_c g$ accelerazione critica

Si ricorda che K_c è il valore che assume il coefficiente sismico K quando il fattore di sicurezza F è uguale a 1. Tale valore può essere ricavato attraverso successive analisi pseudostatiche inverse in cui si riduce il coefficiente sismico fino a raggiungere la condizione $F=1$.

I valori di v_{max} possono essere valutati sulla base dei valori di a_{max} :

per	$a_{max} = 0.35g$	$v_{max} = 40$ cm/s
per	$a_{max} = 0.25g$	$v_{max} = 30$ cm/s
per	$a_{max} = 0.15g$	$v_{max} = 15$ cm/s

Riferimenti bibliografici

- A.G.I. (1977) – Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.
- A.G.I. (2005) – Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee guida. *Patron Editore, Bologna*
- Andrus R. D., Stokoe K. H. (2000) - Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE 126 (11), 1015–1025.
- Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2014). “CPT and SPT based liquefaction triggering procedures.” Report No. UCD/CGM-14/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis, California.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). “Soil liquefaction during earthquakes.” MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, USA.
- Marchetti S. (2015) – Incorporating the Stress History Parameter K_D of DMT into the Liquefaction Correlations in Clean Uncemented Sands, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE 04015072
- Matasovic N. (1993) – Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits. *University of California, Los Angeles, Ph.D. Thesis*
- Matsui T., Ohara S., Ito T. (1980) – Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 106, No. 10, pp. 1101-1120
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018) –Norme Tecniche per le Costruzioni. D.M. 17 gennaio 2018. *G.U. 42 del 20.02.2018, Suppl. ord. n. 8*
- Pradel D. (1998) - Procedure to Evaluate Earthquake-Induced Settlements in Dry Sandy Soils *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124 (4)
- Seed H.B., Booker J.R. (1977) – Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 103, No. 7, pp. 757-768
- Seed H.B., Idriss I.M., Makdisi F., Banerjee N. (1975) – Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses. *EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley
- Sonmez H. (2003) – Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). *Environ. Geology* 44(7): 8
- Tatsuoka, F., Zhou, S., Sato, T., Shibuya, S. (1990). “Method of evaluating liquefaction potential and its application.” In Report on seismic hazards on the ground in urban areas, Ministry of Education of Japan, Tokyo. (in Japanese.)
- Wu J., Seed R.B. (2004) – Estimating of liquefaction-induced ground settlement (case studies). Proc. 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, Paper 3.09, New York
- Yasuhara K., Andersen K.H. (1991) – Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading. *Soils and Foundations*, vol. 31, No 1, pp. 83-94
- Zhang G., Robertson P., Brachman R. (2002) – Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground: Canadian Geotech. Journal, 39, pp. 1168–1180.

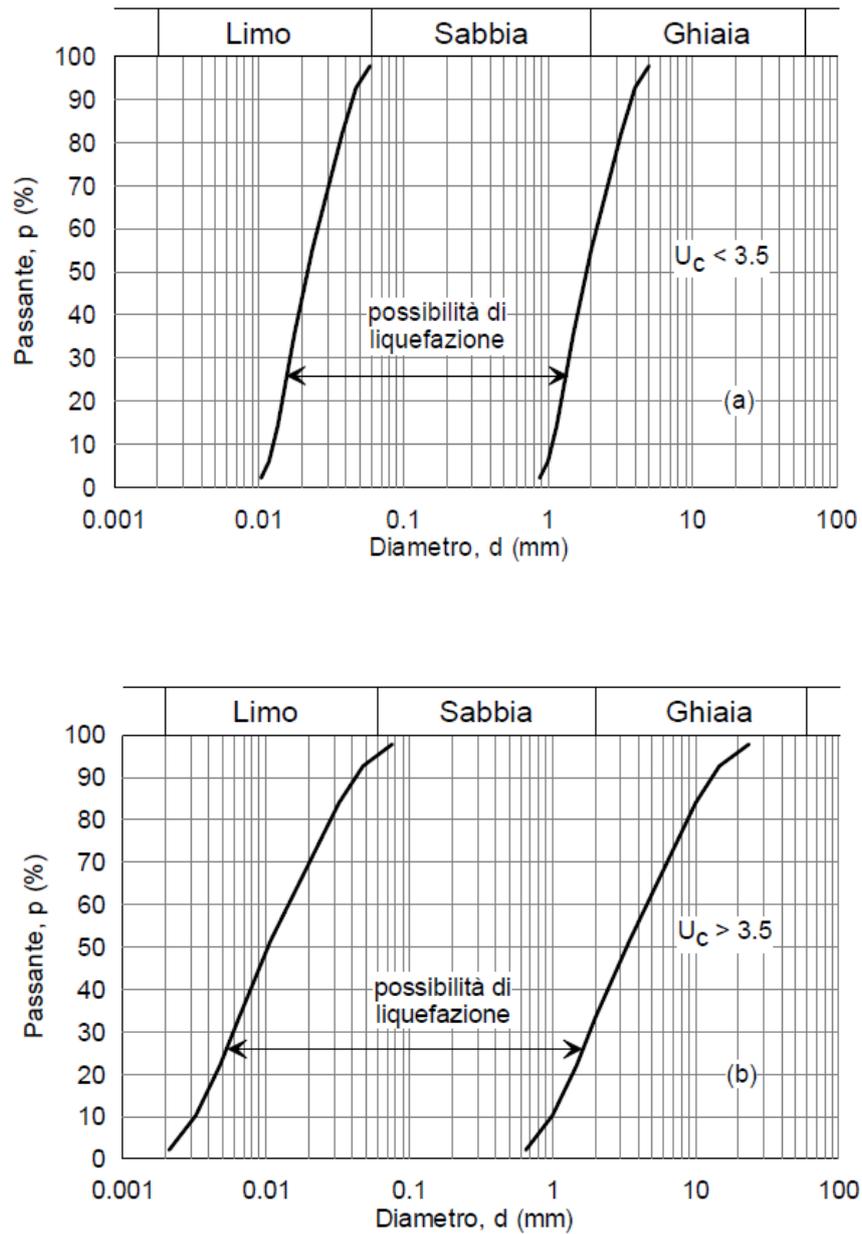


Figura 1 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione di terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (AGI, 2005)

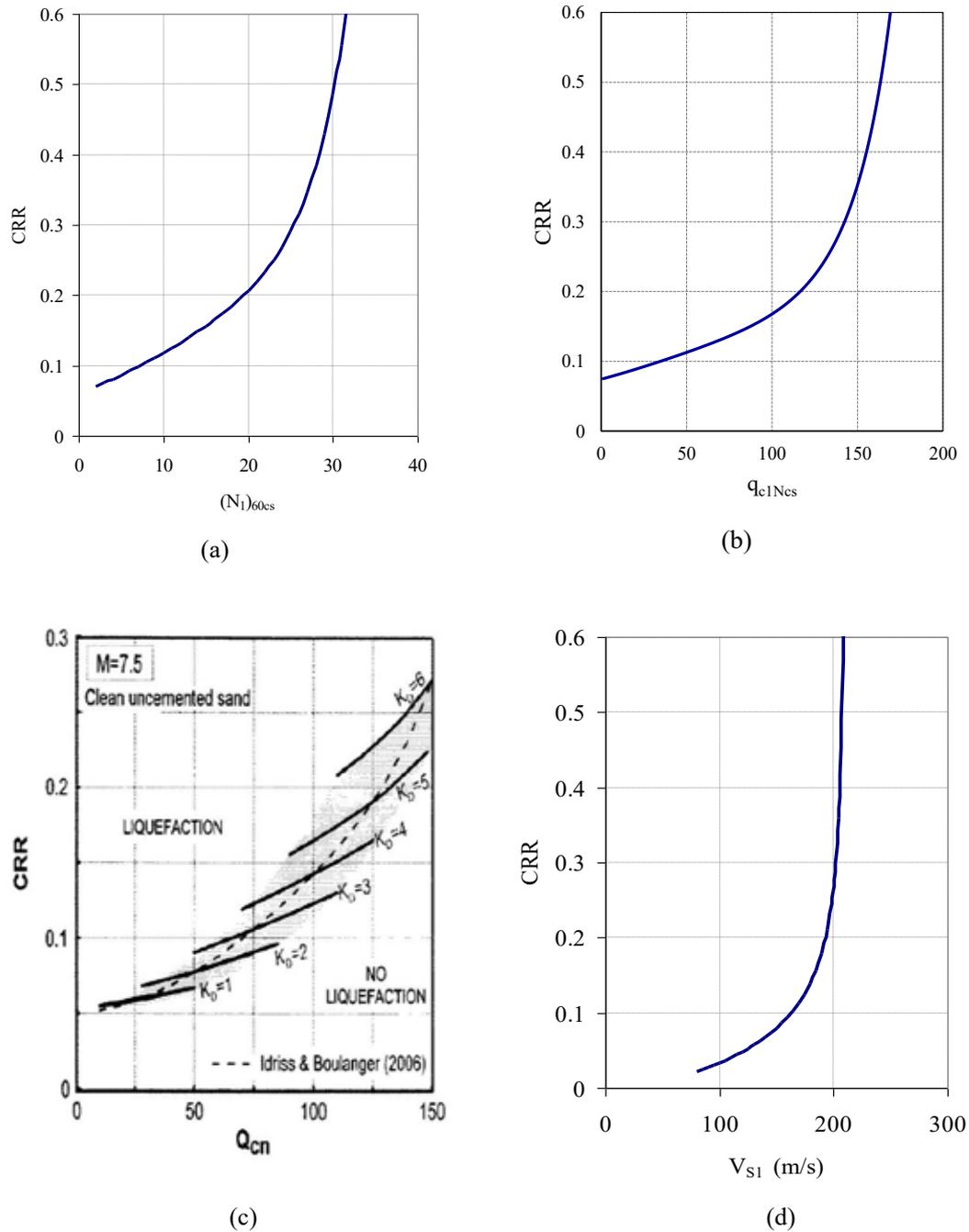


Figura 2 – Carte per la stima della resistenza normalizzata alla liquefazione CRR di un terreno sabbioso saturo sulla base dai risultati di prove SPT (a), CPTe (b), DMT (c) (Marchetti, 2015) e da profili di V_s (d)

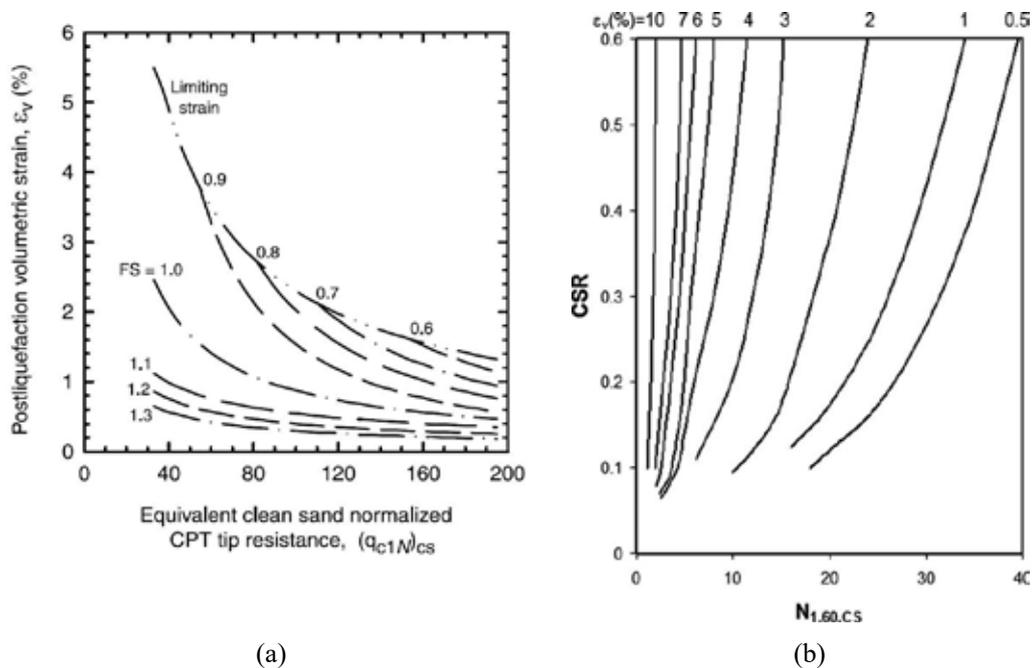


Figura 3 - Carte per la stima delle deformazioni volumetriche indotte dall'azione sismica nei terreni granulari saturi sulla base dei risultati di prove CPT (a) (Zhang et al., 2002), e SPT (b) (Wu e Seed, 2004)

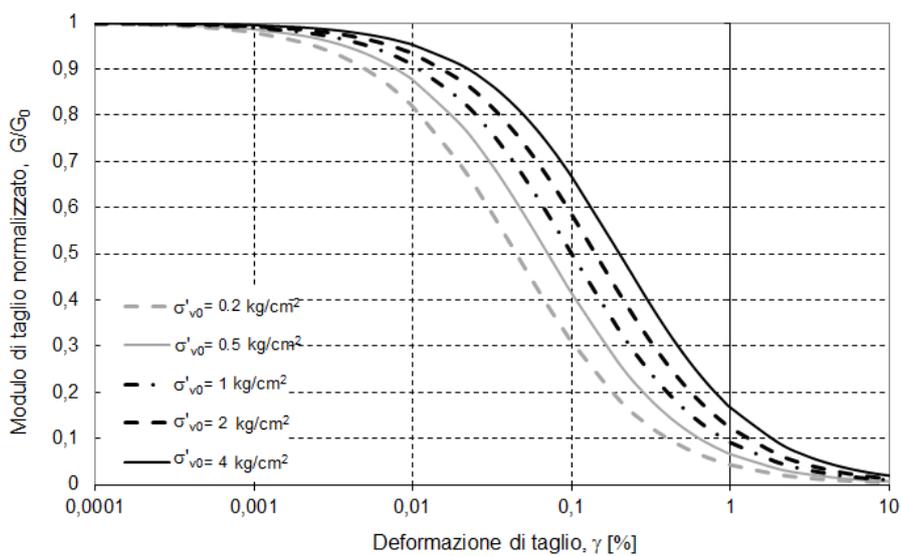


Figura 4 – Curve $G/G_0 - \gamma$ di letteratura per sabbie (AGI, 2005)

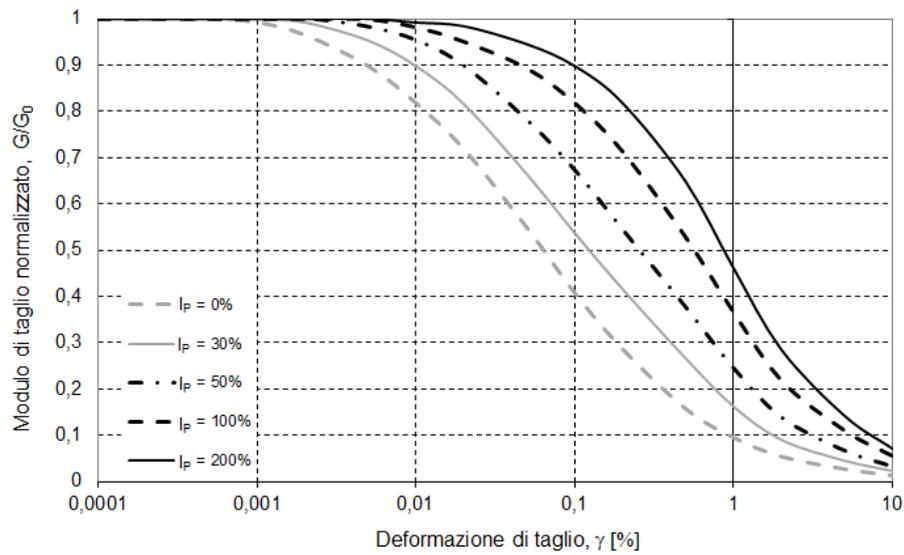


Figura 5 – Curve $G/G_0 - \gamma$ di letteratura per terreni a grana fine (AGI, 2005)

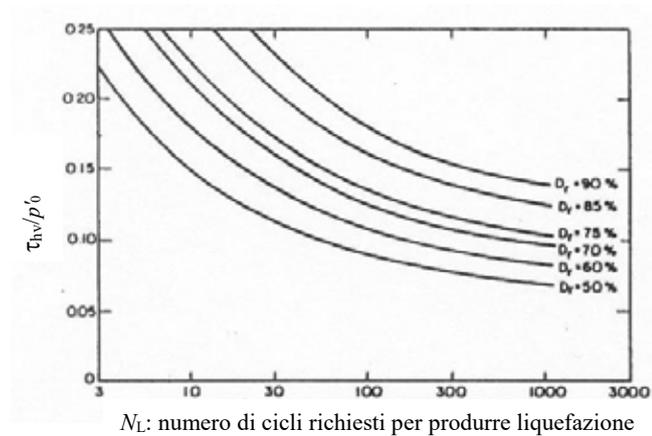


Figura 6. Curve di resistenza alla liquefazione da prove di taglio cicliche (Seed et al., 1975)

SIMBOLI E ACRONIMI

a	coefficiente
A	coefficiente
a	coefficiente funzione di α
a_c	accelerazione critica
a_g	accelerazione orizzontale di picco su roccia o terreno rigido di riferimento
a_{max}	accelerazione massima del moto alla base del pendio
$a_{max s}$	accelerazione massima al piano campagna
b	coefficiente
B	coefficiente
b	coefficiente funzione di α
c	coefficiente funzione di α
C_B	coefficiente di correzione dell'indice N_{SPT} per dimensioni del foro
C_E	coefficiente di correzione dell'indice N_{SPT} per rendimento energetico ER
CH	prova Cross-Hole
C_N	coefficiente di correzione dell'indice N_{SPT} e della resistenza di punta q_c per pressione verticale efficace
CPT	prova penetrometrica statica
CPTe	prova penetrometrica statica a punta elettrica
CPTu	prova penetrometrica statica con piezocono
C_R	coefficiente di correzione dell'indice N_{SPT} per lunghezza delle aste
C_r	indice di ricompressione edometrico
CRR	rapporto di resistenza ciclica
C_S	coefficiente di correzione dell'indice N_{SPT} per campionario senza rivestimento
C_s	indice di rigonfiamento edometrico
CSR	rapporto di tensione ciclica
c_u	resistenza al taglio non drenata
c_{u0}	resistenza al taglio non drenata iniziale
C_V	coefficiente di normalizzazione di V_s per tensioni litostatiche
C_σ	coefficiente funzione di $(N_1)_{60}$
DH	prova Down-Hole
DMT	prova dilatometrica
D_R	densità relativa
e_0	indice di vuoti iniziale
F	fattore di sicurezza
F_s	fattore di sicurezza
$F(z)$	variabile funzione di z e di F_L
FC	frazione di fine
F_h	forza sismica orizzontale pseudo-statica
F_L	coefficiente di sicurezza alla liquefazione
F_v	forza sismica verticale pseudo-statica
g	accelerazione di gravità
G	modulo di taglio
G_0	modulo di taglio iniziale (piccole deformazioni)
I_c	indice di classificazione di Robertson
I_c	indice di consistenza
I_D	indice del materiale da prova DMT
I_L	indice del potenziale di liquefazione
I_P	indice di plasticità
K	coefficiente sismico
K_c	coefficiente correttivo di K_D funzione di I_c

K_c	coefficiente sismico critico
K_D	indice di tensione orizzontale da prova DMT
K_h	coefficiente sismico orizzontale
K_v	coefficiente sismico verticale
K_α	fattore di correzione di F_L nei terreni in pendio per tensione di taglio statica iniziale
K_σ	fattore di correzione di F_L per tensioni efficaci
M	magnitudo
MSF	fattore di scala della magnitudo
N	numero di cicli equivalenti del terremoto
$(N_1)_{60}$	indice della prova SPT corretto a $ER=60\%$ e pressione verticale efficace p_a
$(N_1)_{60cs}$	valore equivalente dell'indice $(N_1)_{60}$ per sabbia pulita
N_c	numero di cicli equivalente del terremoto
N_{SPT}	indice della prova SPT
OCR	rapporto di sovraconsolidazione
p'_0	pressione media efficace iniziale
p_0	pressione media totale iniziale
p_a	pressione atmosferica $\cong 100$ kPa
Q	costante empirica
q_c	resistenza penetrometrica di punta
q_{c1N}	resistenza penetrometrica di punta normalizzata alla tensione verticale efficace iniziale
q_{c1Ncs}	valore equivalente di q_{c1N} per sabbia pulita
r	coefficiente funzione di I_p e di OCR
r_d	coefficiente di riduzione dell'azione sismica per la deformabilità del sottosuolo
s	cedimento permanente totale post-sismico
s	coefficiente funzione di I_p e di OCR
S	spostamento sismico di un pendio indefinito
S_0	spostamento sismico del blocco di Newmark
$SCPT$	prova con cono sismico
$SDMT$	prova con dilatometro sismico
SPT	prova SPT (Standard Penetration Test)
t	parametro di degradazione
U_c	coefficiente di uniformità
v_{max}	velocità massima del moto alla base del pendio
V_S	velocità delle onde sismiche di taglio
V_{S1}	velocità delle onde sismiche di taglio normalizzata per tensione verticale efficace iniziale
V_{S1}^*	valore di soglia di V_{S1}
W	peso
$w(z)$	variabile funzione di z
z	profondità dal piano campagna
z_{crit}	profondità critica
$\Delta(N_1)_{60}$	incremento di $(N_1)_{60}$ per FC
Δq_{c1N}	incremento di q_{c1N} per FC
Δs	cedimento indotto dall'azione sismica nello strato di spessore Δz
Δu	incremento di pressione interstiziale
Δz	spessore dello strato
α	angolo di inclinazione della superficie di scorrimento
α	coefficiente funzione di $(N_1)_{60}$
α	coefficiente funzione di q_{c1N}
α	rapporto fra τ_{st} e σ'_{vc}
$\alpha(z)$	coefficiente funzione di z

$\beta(z)$	coefficiente funzione di z
δ	coefficiente di degradazione ciclica
ε_{15}	deformazione volumetrica dopo 15 cicli
ε_{N_c}	deformazione volumetrica per N_c cicli equivalenti
ε_v	deformazione volumetrica
ϕ	angolo di resistenza al taglio
γ	deformazione di taglio ciclica
γ_1	coefficiente di importanza
γ_{max}	deformazione di taglio massima indotta dall'azione sismica di riferimento
γ_v	deformazione di soglia volumetrica
σ'_{v0}	tensione verticale efficace iniziale
σ_{v0}	tensione verticale totale iniziale
τ_{max}	tensione di taglio ciclica massima indotta dall'azione sismica di riferimento
τ_{media}	tensione di taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento
τ_{st}	tensione di taglio statica iniziale in un pendio
τ_{ult}	tensione di taglio resistente per terremoto di magnitudo $M = 7.5$
ξ_R	parametro di stato

ALLEGATO A4**SPETTRI DI RISPOSTA RAPPRESENTATIVI E SEGNALI DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE NELLE ANALISI DI TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO**

I presenti indirizzi dispongono che il calcolo delle risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello sia eseguito sulla base di accelerogrammi di riferimento ricavabili per il sito analizzato seguendo la procedura di seguito descritta che si basa sui valori di pericolosità sismica elaborati da INGV per il territorio nazionale resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0.05 gradi nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema “Sismica – Microzonazione Sismica”.

I segnali sismici sono rappresentativi dello scuotimento atteso, per un periodo di ritorno di 475 anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni), sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, ovvero con V_{s30} superiore a 800 m/s.

Per la definizione del moto di riferimento, nel presente allegato vengono riportati:

- la forma dello spettro di risposta in accelerazione (smorzamento pari al 5%) normalizzato e mediato sul territorio regionale. Questo spettro che è rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni in Emilia-Romagna (figura 1 e tabella 1), è stato ricavato dai valori degli spettri di risposta calcolati per il territorio regionale da INGV¹
- i valori di a_{refg} , ovvero dell'accelerazione massima orizzontale su suolo di riferimento (categoria di sottosuolo A, NTC 2018), espressa in frazione dell'accelerazione di gravità g , con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni corrispondente al periodo di ritorno di 475 anni. I valori sono relativi ai punti di una griglia con passo 0.05 gradi che è fornita nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema “Sismica – Microzonazione Sismica”. I valori di a_{refg} sono stati elaborati da INGV²
- indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati.

Nel file all_4_coord.kmz, nella cartella Allegato_4.zip disponibile nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, oltre i valori di a_{refg} per ogni punto della suddetta griglia INGV sono riportati anche i valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$ necessari per il calcolo del parametro H_{SM} .

Definizione degli spettri di risposta

Il valore di a_{refg} relativo al sito analizzato si ottiene interpolando i valori di a_{refg} definiti nei punti della griglia più prossimi al sito oppure utilizzando il valore del punto della griglia più vicino.

Lo spettro di risposta in accelerazione (smorzamento pari al 5%) a probabilità uniforme, che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni nel sito analizzato si ottiene moltiplicando i valori della tabella 1 per il valore di a_{refg} ottenuto precedentemente.

1 Meletti C., Montaldo V., 2007: *Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag*. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>

2 Montaldo V., Meletti C., 2007: *Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico*. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>

La tabella 1 riporta i valori che definiscono lo spettro di risposta normalizzato. Nella prima colonna sono riportati i valori del periodo proprio T , espresso in secondi, nella seconda i valori di accelerazione spettrale normalizzata al valore di accelerazione massima orizzontale (a_{ref}).

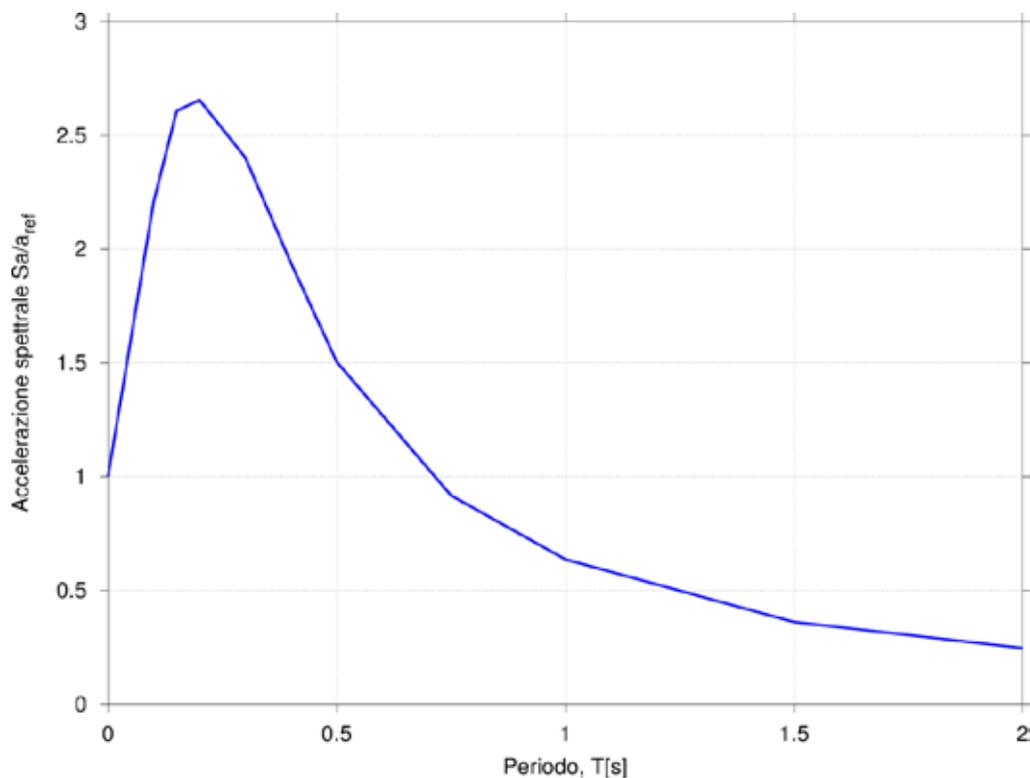


Figura 1: Spettro di risposta normalizzato (Periodo di ritorno: 475 anni, smorzamento: 5%) per l'Emilia-Romagna

T(s)	Sa/a _{ref}
0,00	1,0000
0,10	2,2100
0,15	2,6080
0,20	2,6562
0,30	2,4033
0,40	1,9394
0,50	1,5050
0,75	0,9172
1,00	0,6359
1,50	0,3608
2,00	0,2462

Tabella 1: Valori che definiscono lo spettro normalizzato previsto per l'Emilia-Romagna (si veda anche figura 1)

Definizione dei segnali di riferimento

I segnali di riferimento forniti sono stati selezionati dalla banca dati accelerometrica “European Strong Motion database” (http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm, nel seguito citata come ISESD) attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento (nel nostro caso questa forma spettrale corrisponde alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni di figura 1) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD.

I segnali di riferimento sono stati normalizzati affinché la loro ampiezza massima assoluta sia unitaria.

I files con i segnali di riferimento normalizzati sono disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema “Sismica – Microzonazione Sismica”. Si tratta di tre files:

- 000046xa.xy
- 000126xa.xy
- 000354xa.xy

Il nome del file corrisponde al codice identificativo ISESD della registrazione accelerometrica.

Ogni file contiene due colonne: la prima colonna corrisponde al tempo, espresso in secondi, la seconda contiene il valore di accelerazione normalizzata.

Il moto sismico (periodo di ritorno 475 anni) in termini di accelerogrammi relativi al sito analizzato è ottenuto moltiplicando le accelerazioni normalizzate dei segnali di riferimento (seconda colonna del file) per il valore di a_{refg} ottenuto con la procedura descritta nel precedente paragrafo.