

**GIUNTA DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA**

**Questo giorno** lunedì 21 **del mese di** dicembre  
**dell' anno** 2015 **si è riunita nella residenza di** via Aldo Moro, 52 BOLOGNA  
**la Giunta regionale con l'intervento dei Signori:**

1) Bonaccini Stefano	Presidente
2) Gualmini Elisabetta	Vicepresidente
3) Bianchi Patrizio	Assessore
4) Caselli Simona	Assessore
5) Corsini Andrea	Assessore
6) Costi Palma	Assessore
7) Donini Raffaele	Assessore
8) Gazzolo Paola	Assessore
9) Mezzetti Massimo	Assessore
10) Petitti Emma	Assessore
11) Venturi Sergio	Assessore

**Funge da Segretario l'Assessore** Costi Palma

**Oggetto:** ART. 16 DELLA L.R. N.20 DEL 24/3/2000. APPROVAZIONE 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 DELIBERAZIONE DELL'ASSEMBLEA LEGISLATIVA 2 MAGGIO 2007, N. 112.

**Cod.documento** GPG/2015/2381

**Num. Reg. Proposta: GPG/2015/2381**

**LA GIUNTA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA**

Premesso che:

- la microzonazione sismica (MS), cioè la suddivisione dettagliata del territorio in base alla risposta sismica locale, 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;
- 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 la maggior parte dei Comuni dell'Emilia-Romagna sono classificati in zona 2 e zona 3 e solo una minima parte in zona 4;
- la L.R. 20/2000 "Disciplina generale 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;
- questa Regione con deliberazione dell'Assemblea Legislativa n.112/2007 ha approvato gli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";
- con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1373/2011 è stato approvato l'atto di indirizzo recante "Individuazione della documentazione attinente alla

riduzione del rischio sismico necessaria per il rilascio del permesso di costruire e per gli altri titoli edilizi, alla individuazione degli elaborati costitutivi e dei contenuti del progetto esecutivo riguardante le strutture e alla definizione delle modalità di controllo degli stessi, ai sensi dell'art. 12, comma 1, e dell'art. 4, comma 1, della L.R. n. 19 del 2008" che richiede, per la fase di progettazione, il rispetto delle prescrizioni sismiche contenute negli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica;

Considerato che, successivamente all'approvazione ed entrata in vigore dei suddetti indirizzi regionali per la microzonazione sismica:

- con D.M. 14 gennaio 2008 sono state pubblicate le "Norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2008) che 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;

- 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;

Considerato inoltre che al fine di adempiere agli obblighi delle sopra richiamate NTC 2008 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;

Visto che:

- la pianura emiliana nel maggio-giugno 2012 è stata interessata da una sequenza sismica caratterizzata da numerosi terremoti di magnitudo locale superiore a 5 che hanno prodotto gravi danni su un estesa porzione di territorio regionale compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Ferrara e Bologna, anche a causa di effetti di amplificazione sismica e liquefazione determinati dalle particolari condizioni geologiche locali;

- le indagini e gli studi realizzati per la comprensione degli effetti locali osservati a seguito dei suddetti terremoti emiliani di maggio-giugno 2012 hanno permesso l'acquisizione di nuove conoscenze e prodotto risultati di rilevante interesse per la valutazione e la stima degli effetti locali, in particolare relativamente al fenomeno della liquefazione;

Visti inoltre i numerosi studi di microzonazione sismica finora realizzati, sia in Emilia-Romagna che in altre Regioni, e in particolare:

- gli studi effettuati nell'ambito delle Ordinanze attuative dell'art. 11 L. n. 77/2009; la microzonazione sismica dei Comuni più colpiti dai terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012, di cui alle Ordinanze del Commissario delegato - Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012 e n. 84/2013;

- la microzonazione sismica dei Comuni colpiti dal terremoto di L'Aquila del 6 aprile 2009, che ha visto la partecipazione attiva dei tecnici della Regione Emilia-Romagna;

Ritenuto pertanto che appare opportuno provvedere all'aggiornamento dell'atto di indirizzo di cui alla citata DAL n. 112/2007, 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;

Constatato che, ai fini dell'aggiornamento dell'atto di indirizzo di cui in precedenza, la Regione Emilia-Romagna, nell'ambito dei contributi per studi di riduzione del rischio sismico di cui all'OPCM 4007/2012, art. 17, comma 2, ha conferito incarichi all'Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (IDPA) del CNR, unità di Milano, e al Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Firenze per la revisione e l'aggiornamento delle procedure, degli abachi e delle formule per la stima

dell'amplificazione sismica e degli indici di rischio degli effetti locali (Allegati A2, A3 e A4 della DAL 112/2007);

Considerate inoltre le fusioni di Comuni già attuate, quelle in atto e quelle future, che rendono non direttamente applicabili, nei nuovi Comuni, le procedure di calcolo dell'azione sismica per gli studi di terzo livello di approfondimento previste dagli attuali indirizzi (Allegato 3 della DAL 112/2007), poiché basate su valori medi del moto sismico di riferimento calcolati per ogni Comune della Regione prima delle fusioni (Allegato 4 della DAL 112/2007);

Viste:

- la revisione dell'Allegato A2 della DAL 112/2007, effettuata nell'ambito delle attività previste dall'art. 17 dell'OPCM 4007/2012 (attuazione della seconda annualità del fondo per studi di riduzione del rischio sismico previsto dall'art. 11 L. 77/2009), a cura del Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per le Dinamiche Ambientali, unità di Milano, trasmesso in data 20/12/2013, successivamente aggiornata nel settembre 2015;

- la revisione dell'Allegato A3 della DAL 112/2007, effettuata nell'ambito delle attività previste dall'art. 17 dell'OPCM 4007/2012 (attuazione della seconda annualità del fondo per studi di riduzione del rischio sismico previsto dall'art. 11 L. 77/2009), a cura del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, trasmessa in data 23/12/2013, successivamente aggiornata nell'ottobre 2015;

- la revisione dell'Allegato A4 della DAL 112/2007 a cura del Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per le Dinamiche Ambientali, unità di Milano, trasmessa in data 23 ottobre 2015;

- le modifiche di alcune parti degli Allegati A e A1, rese necessarie dalla pubblicazione delle NTC 2008 e degli ICMS 2008, dalle fusioni di Comuni e dalle revisioni degli Allegati 2, 3 e 4 sopra indicate;

Viste inoltre le osservazioni e richieste di integrazioni e modifiche pervenute dall'Ordine dei Geologi dell'Emilia-Romagna in data 30/11/2015, prot. PG.2015.854541 del 1/12/2015;

Ritenuto per quanto sopra detto di procedere, ai sensi dell'art. 16 della LR 20/2000, all'approvazione dell'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 deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112, attraverso la modifica degli allegati A e A1 e la sostituzione degli allegati A2, A3 e A4 della stessa deliberazione, con quelli facenti parte integrante del presente atto al fine di ridefinire i criteri, 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. 112 del 2007.

Dato atto che sulla proposta del citato atto allegato si è espresso con parere favorevole il CAL - Consiglio delle Autonomie Locali, a norma dell'art. 16, comma 3, della LR 20 del 2000 e dell'art. 6 della LR 13/2009, nella seduta del 16 dicembre 2016, prot. PG.2015.875111 del 16/12/2015;

Richiamata la propria deliberazione n. 2416 del 29 dicembre 2008 concernente "Indirizzi in ordine alle relazioni organizzative e funzionali tra strutture e sull'esercizio delle funzioni dirigenziali";

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

D E L I B E R A

1. di approvare, ai sensi dell'art. 16 della LR 20 del 2000, 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 deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112, attraverso la modifica degli Allegati A e A1 e la sostituzione degli Allegati A2, A3 e A4 della stessa deliberazione, con quelli facenti parte integrante della presente deliberazione, 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 completa ripubblicazione del testo coordinato della DAL n. 112 del 2007, come modificata dal presente provvedimento, quale Allegato II al presente provvedimento;

3. di stabilire che il presente atto di coordinamento tecnico deve essere osservato per l'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. 112 del 2007;

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

## ALLEGATO A

### **Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della LR 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"**

#### **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

Gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica concorrono alla riduzione del rischio sismico – così come specificato nell'art. A-2, comma 4, dell'Allegato alla LR 20/2000<sup>1</sup> - 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 ai vari livelli di pianificazione.

Pertanto, nel definire il quadro conoscitivo, gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica devono 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 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 locale<sup>2</sup> 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;
- la suddivisione del territorio in sottozone a diversa pericolosità sismica locale (microzonazione sismica).

I risultati dell'analisi della pericolosità sismica locale, della microzonazione sismica devono essere recepiti negli strumenti di pianificazione territoriale, urbanistica comunale 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

---

<sup>1</sup> *“Nei territori regionali individuati come zone sismiche, ai sensi dell'art. 145 della LR n. 3 del 1999, gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica concorrono alla riduzione ed alla prevenzione del rischio sismico, sulla base delle analisi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.”*

<sup>2</sup> 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”.

sismica e/o fornire indicazioni per scelte progettuali che tengano adeguatamente conto delle condizioni di pericolosità sismica locale.

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

Gli studi di microzonazione sismica devono essere descritti in una relazione che indichi chiaramente il livello di approfondimento, le indagini effettuate ed i risultati ottenuti; devono essere inoltre illustrati da una cartografia dettagliata dello stato del territorio. Essi sono riferimento necessario per la Valutazione di Sostenibilità Ambientale e Territoriale (VALSAT) preventiva delle singole scelte del piano.

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

La prima fase è diretta a definire gli scenari di pericolosità sismica locale, cioè ad 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 elaborazione del PTCP e del PSC e concorre alla definizione delle scelte di piano, fornendo prime indicazioni sui limiti e le condizioni per la pianificazione nelle suddette aree.

La seconda fase 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) 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 monodimensionale, si ritiene sufficiente **un'analisi semplificata** (secondo livello di approfondimento), cioè l'analisi della pericolosità 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 abachi 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 nei seguenti casi (vedere Allegato A1):

- aree soggette a liquefazione e densificazione;
- aree instabili<sup>3</sup> e potenzialmente instabili;
- aree con rapida variazione della profondità del substrato rigido, come ad esempio le valli strette e profondamente incise, il cui modello stratigrafico non può essere assimilato ad un modello fisico monodimensionale; in questo caso sono raccomandate analisi bidimensionali.

---

<sup>3</sup> Naturalmente nelle ipotesi nelle quali la pianificazione preveda comunque l'utilizzo ai fini edificatori di tali aree.

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.

La prima fase, o primo livello di approfondimento (individuazione delle aree potenzialmente soggette ad effetti locali), viene attuata già nell'ambito della pianificazione a scala di area vasta (es. provinciale), relativamente all'intero territorio, ed è recepita e integrata, ad una scala di maggior dettaglio, nella pianificazione urbanistica comunale, limitatamente alle zone da indagare di cui al par. 2.1.

La seconda fase (analisi della risposta sismica locale e microzonazione sismica del territorio) è richiesta per la predisposizione e approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale e deve interessare le aree già urbanizzate e quelle indicate come suscettibili di urbanizzazione, i corridoi infrastrutturali e gli agglomerati posti in territorio rurale che possano considerarsi significativi, per dimensione e/o interesse insediativo, in rapporto alla realtà territoriale locale, ricadenti nelle aree potenzialmente soggette ad effetti locali individuate nella prima fase.

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 griglia<sup>4</sup>, 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)<sup>5</sup>.

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 renderle suscettibili di trasformazione urbanistica.

### *2.1 - Zone da indagare*

Le zone su cui effettuare le indagini variano a seconda della scala dello strumento di pianificazione considerato:

- a scala d'area vasta, ad esempio provinciale, occorre indagare l'intero territorio;
- a scala comunale, partendo dagli scenari di pericolosità sismica locale definiti dalla cartografia di area vasta di prima fase, le zone da indagare comprendono:
  - il territorio urbanizzato (la città esistente);

---

<sup>4</sup> I punti della griglia regionale sono derivati da quelli della griglia delle mappe interattive di pericolosità sismica INGV.

<sup>5</sup> 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.

- il territorio urbanizzabile (le parti del territorio potenzialmente suscettibili di trasformazioni urbanistiche per l'espansione o la riqualificazione della città);
- gli agglomerati posti in territorio rurale di dimensioni significative (ad es. insediamenti nastriformi attestati su viabilità, nuclei situati in continuità del territorio urbanizzato, etc.)
- 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.

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

## 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 ([http://demetra.regione.emilia-romagna.it/stampe/DEL/7/2003/DEL\\_2003\\_484/DEL\\_2003\\_484\\_v1.pdf](http://demetra.regione.emilia-romagna.it/stampe/DEL/7/2003/DEL_2003_484/DEL_2003_484_v1.pdf)).

I risultati e gli elaborati devono essere forniti, su supporto cartaceo e su supporto digitale secondo le specifiche dell'ultima versione delle linee guida del Dipartimento della Protezione Civile disponibili nel sito <http://www.protezionecivile.gov.it>.

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

Per la realizzazione e l'utilizzo, nel processo di pianificazione, degli elaborati di seguito illustrati, le Amministrazioni potranno avvalersi del supporto, in fase di coordinamento, del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e del Servizio Pianificazione Urbanistica, Paesaggio e uso sostenibile del territorio della Regione Emilia-Romagna

# 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 (es. analisi delle condizioni di pericolosità sismica locale per il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, PTCP) deve essere prodotta, per l'intero territorio, la "Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali"<sup>6</sup>. In tale cartografia devono essere 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 utile per indirizzare le scelte verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica.

<sup>6</sup> Nel caso in cui la pianificazione provinciale assuma il ruolo e gli effetti della pianificazione comunale, la carta sarà adeguata al livello di pianificazione comunale a cui accede.

Il Piano Strutturale Comunale (PSC), attuando gli indirizzi previsti dalla pianificazione sovraordinata, dovrà realizzare una nuova 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 PSC (o del PTCP<sup>7</sup>) in merito agli ambiti suscettibili di urbanizzazione e per gli interventi sul territorio urbanizzato 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.

Sulla base della medesima carta comunale, le disposizioni del PSC (o del PTCP<sup>8</sup>) forniscono indirizzi e prescrizioni necessari alla progettazione attuativa/operativa assegnata al Regolamento Urbanistico ed Edilizio (RUE) e al Piano Operativo Comunale (POC), per le parti del territorio che risultano maggiormente esposte a pericolosità sismica.

### *3.1.1 - Elaborati da produrre*

Per gli studi di area vasta, es. PTCP, 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 il PSC la cartografia realizzata alla scala di area vasta dovrà essere approfondita e integrata realizzando una "Carta comunale delle aree suscettibili di effetti locali" di maggiore dettaglio, 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

---

<sup>7</sup> Qualora lo stesso assuma ruolo ed effetti della pianificazione comunale.

<sup>8</sup> Vedi nota 7.

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 degli indirizzi regionali; in particolare dovranno essere chiaramente perimetrare 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, ...).

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 sulle 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 funzioni HVSR o SSR nell'intervallo 0.2÷20 Hz) o da presenza di fenomeni di risonanza, distinguendo fra spessori attesi maggiori di 200 m (indicativamente  $f_0 \leq 0,6$  Hz), spessori compresi tra 200 e 100 m (indicativamente  $0,6 \text{ Hz} < f_0 \leq 1$  Hz), spessori compresi fra 100 e 30 m (indicativamente  $1 \text{ Hz} < f_0 \leq 2$  Hz), spessori compresi fra 30 e 10 m (indicativamente  $2 \text{ Hz} < f_0 \leq 8$  Hz), spessori 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  $\geq 3$ ), 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 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; ...).

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 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 substrato rigido 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'utilizzo di abachi, 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,
  - 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 substrato rigido. La definizione del substrato rigido 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 allegare 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 allegare 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.

##### **4.1 - Secondo livello di approfondimento – analisi semplificata**

Il secondo livello di approfondimento ha le seguenti finalità:

- la conferma delle condizioni di pericolosità indicate dal precedente livello di approfondimento ed eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la microzonazione sismica;
- la suddivisione dettagliata del territorio, in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità sismica;
- 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.

E' questo il livello di approfondimento minimo richiesto per l'approvazione del PSC.

L'analisi semplificata è richiesta e ritenuta sufficiente per la stima dell'amplificazione, negli ambiti suscettibili di urbanizzazione e per gli interventi sul territorio urbanizzato, 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 substrato rigido l'analisi monodimensionale, e quindi anche l'utilizzo di abachi, 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 gli abachi, 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 PSC (o del PTCP<sup>9</sup>) e delle sue varianti 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.

---

<sup>9</sup> Qualora lo stesso assuma ruolo ed effetti della pianificazione comunale.

#### 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 dei fattori di amplificazione delle aree individuate nella “Carta comunale delle aree suscettibili di effetti locali”, a scala almeno 1:10.000, preferibilmente di maggiore dettaglio<sup>10</sup>. Questa cartografia costituisce l’elaborato principale di questo livello di approfondimento. La stima dell’amplificazione tramite procedure semplificate (utilizzo di abachi e formule) è possibile laddove l’assetto geologico è assimilabile ad un modello fisico monodimensionale. L’amplificazione sarà quantificata in termini di parametri  $FA_{PGA}$ ,  $FA_{0,1-0,5s}$ ,  $FA_{0,5-1s}$ ,  $FA_{0,5-1,5s}$  che esprimono l’amplificazione per motivi stratigrafici, 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 riferimento. Questi fattori sono espressi sia in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale ( $FA_{PGA}=PGA/PGA_0$ ) sia di rapporto di Intensità di Housner ( $SI/SI_0$ )<sup>11</sup> per prefissati intervalli di periodi ( $FA_{0,1-0,5s}$ ,  $FA_{0,5-1s}$ ,  $FA_{0,5-1,5s}$ ), dove  $PGA_0$  e  $SI_0$  sono rispettivamente l’accelerazione massima orizzontale e l’Intensità di Housner al suolo di riferimento ricavabili dal data base regionale (disponibile nel sito internet del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale) e  $PGA$  e  $SI$  sono le corrispondenti grandezze di accelerazione massima orizzontale e Intensità di Housner calcolate alla superficie dei siti esaminati<sup>12</sup>.

Si ricorda che la scelta degli abachi 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 degli abachi utilizzati 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, gli abachi utilizzati per la stima dell’amplificazione. Dovranno essere perimetrate 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.

#### 4.1.2 - Acquisizione dei dati

Per l’utilizzo degli abachi e delle tabelle è necessario determinare la stratigrafia del sottosuolo, in particolare lo spessore  $H$  della copertura, o profondità del substrato rigido, e il valore di  $V_s$  nell’intervallo di spessore  $H$ .

<sup>10</sup> La scala è da rapportare alle dimensioni dell’area studiata.

<sup>11</sup> L’Intensità di Housner  $SI_t$  è definita da

$$SI = \int_{T_1}^{T_2} PSV_{(\zeta=5\%)} dT \quad \text{dove } PSV \text{ è lo spettro di risposta in velocità (smorzamento } \zeta = 5\%).$$

<sup>12</sup> 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.

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 substrato rigido.

E' 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 nelle aree nelle quali si intenda localizzare ambiti di riqualificazione e nuovo insediamento, nelle seguenti situazioni:

- a) aree suscettibili di liquefazione o densificazione;
- b) aree di versante instabili e potenzialmente instabili;
- c) aree con rapide variazioni della profondità del substrato rigido, 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;
- d) 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).

Questo livello di analisi è quindi finalizzato a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree instabili e potenzialmente instabili, di quelle soggette a liquefazione e densificazione, sempre ai fini della redazione della carta di microzonazione.

Gli ambiti per i quali è richiesta l'attuazione di questo terzo livello di approfondimento, attraverso il primo livello di analisi, devono, pertanto, essere già individuati anche nella cartografia delle aree suscettibili di effetti locali.

Di conseguenza, le indicazioni normative urbanistiche, anche dei piani di area vasta (es. quelle del PTCP), devono prevedere che la pianificazione urbanistica comunale, relativamente a queste aree debba subordinare la previsione di ambiti di riqualificazione o nuovo insediamento all'attuazione di questo livello di analisi.

In particolare, tali studi possono essere acquisiti nella fase di predisposizione e approvazione del POC, disciplinati dallo stesso e per i progetti la cui approvazione costituisce variante al POC. Se il secondo livello di approfondimento realizzato per l'approvazione del PSC ha evidenziato potenziali condizioni di instabilità in aree di POC, per l'approvazione del POC è necessario che in tali aree siano effettuati approfondimenti di terzo livello.

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:
  1.  $PGA/PGA_0$ ;
  2.  $SI/SI_0$

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.

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 substrato rigido.

#### *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 o dedotti dalle curve di dispersione delle onde di superficie misurate; laddove le condizioni geologiche lo permettano potranno essere effettuate prove penetrometriche statiche con cono sismico o con dilatometro sismico.

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. 20/2000 "Disciplina generale 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, ai fini dell'espressione del parere provinciale sugli strumenti urbanistici e loro varianti ai sensi dell'art. 5 della LR 19/2008, in merito alla compatibilità delle previsioni con le condizioni di pericolosità locale del territorio, 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.

Lo svolgimento degli studi di microzonazione sismica avviene attraverso un approfondimento delle analisi e delle valutazioni che vede in primo luogo l'adeguamento dell'analisi della pericolosità sismica locale a scala di area vasta (es. PTCP) e, successivamente il recepimento e l'approfondimento delle indicazioni da esso fornite dal PSC e quindi dal POC. Si ritiene tuttavia che, vi sia la possibilità di conformare gli atti di pianificazione in corso di approvazione al presente atto di indirizzo anche in carenza del preventivo adeguamento della pianificazione sovraordinata. Ciò al fine di consentire l'approvazione di detti strumenti urbanistici senza dover attendere il preventivo allineamenti degli strumenti di pianificazione sovraordinata.

In particolare, si sottolinea che:

- le Province devono adeguare i PTCP secondo quanto previsto al capitolo 3, nonché corredare il Piano del conseguente apparato normativo;
- i Comuni, attuando gli indirizzi dei piani territoriali di area vasta (es. PTCP), devono adeguare i propri PSC, provvedendo a tal fine a realizzare la microzonazione sismica come indicato nei capitoli 3 e 4, nonché a corredare il Piano del conseguente apparato normativo;
- in assenza di indicazioni nei piani territoriali di area vasta (es. PTCP), i Comuni dovranno comunque adeguare il PSC secondo quanto previsto nei capitoli 3 e 4, provvedendo a tal fine a realizzare la microzonazione sismica nonché a corredare il Piano del conseguente apparato normativo;
- i Comuni, in assenza di PSC già adeguati ai criteri previsti nei capitoli 3 e 4, al momento dell'elaborazione del POC provvedono direttamente allo svolgimento delle analisi di cui al par. 4.2, nonché a corredare il Piano del conseguente apparato normativo, per le parti di territorio interessate dai medesimi strumenti;
- gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica in corso di approvazione alla data di entrata in vigore del presente atto di indirizzo provvedono ad integrare i propri contenuti secondo quanto previsto nei capitoli 3 e 4.

La microzonazione sismica di secondo livello è il livello di approfondimento minimo richiesto per l'approvazione del PSC.

I dati, gli elaborati e i risultati degli studi di microzonazione sismica devono essere recepiti negli strumenti di pianificazione urbanistica. Questi devono contenere indicazioni normative per la corretta applicazione dei risultati della microzonazione sismica, anche al fine di favorire la migliore programmazione delle indagini per la riduzione del rischio sismico nell'ambito della progettazione e realizzazione delle costruzioni.

## 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  $\geq 3$  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 (per uno spessore  $\geq 3$  m);
- substrato non rigido ( $V_s \ll 800$  m/s)<sup>11</sup> affiorante.

Elementi morfologici che possono determinare amplificazione:

- creste, cocuzzoli, dorsali allungate, versanti con acclività  $> 15^\circ$  e altezza  $\geq 30$  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  $\geq 3$  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, sono possibili 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<sup>12</sup> 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;
- faglie attive e capaci *sensu* ICMS (2008) e CTMS (2015);

<sup>11</sup> 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.

<sup>12</sup> Rientrano in questa categoria i terreni con spaziatura della fratturazione  $< 20$  cm.

- 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 stratigrafici <sup>13</sup>.

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](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](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137)

---

<sup>13</sup> 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 VALUTAZIONE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA PER LE ANALISI DEL SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO E PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI TOPOGRAFICI.**

**A2.1 - Tabelle per il calcolo dei coefficienti di amplificazione sismica (secondo livello di approfondimento)**

Per calcolare i Fattori di Amplificazione (FA) richiesti nell'analisi semplificata devono essere realizzate indagini geotecniche e geofisiche che permettano la definizione dello spessore del deposito di copertura o profondità del substrato rigido ( $H$ ) e della velocità equivalente delle onde di taglio per lo spessore considerato ( $V_{sH}$  e  $V_{s30}$ ) del deposito di copertura secondo le formule di seguito riportate:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N h_i / V_{s_i}}$$

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 substrato rigido,

$h_i$  = spessore (in m) dello strato  $i$ -esimo (fino al substrato rigido),

$V_{s_i}$  = velocità (in m/s) dello strato  $i$ -esimo (fino al substrato rigido);

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^M h_i / V_{s_i}}$$

dove  $M$  è il numero di strati del profilo sismico fino alla profondità di 30 m,

$h_i$  = spessore (in m) dello strato  $i$ -esimo (fino alla profondità di 30 m),

$V_{s_i}$  = 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.II delle Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC (2008), come segue:

*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.*

I FA sono relativi a due parametri rappresentativi dello scuotimento sismico.

Il primo è l'accelerazione di picco orizzontale (**PGA**), il secondo è l'intensità spettrale:

$$SI = \int_{T_1}^{T_2} PSV(T_0, \xi) dT_0$$

dove  $PSV$  è il pseudospettro di risposta in velocità,  $T_0$  è il periodo proprio e  $\xi$  è lo smorzamento.

E' stato considerato uno smorzamento  $\xi = 5 \%$  e tre intervalli di periodo proprio  $T_0$  ottenendo tre valori di intensità spettrale:

**SI1** :  $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$

**SI2** :  $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$

**SI3** :  $0.5s \leq T_0 \leq 1.5s$

A2.1.1 - APPENNINO (zone collinari e montane)

In caso di substrato rigido, generalmente caratterizzato da  $V_s \geq 800$  m/s, si devono usare le seguenti tabelle

	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

Fattori di Amplificazione **PGA**. Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

	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

Fattori di Amplificazione **SI1** ( $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$ ). Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

	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

Fattori di Amplificazione **SI2** ( $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$ ). Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

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

	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

Fattori di Amplificazione **PGA**. Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

	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

Fattori di Amplificazione **SI1** ( $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$ ). Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

	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

Fattori di Amplificazione **SI2** ( $0.5s \leq T_0 \leq 1.0s$ ). Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

In caso di substrato marino non rigido, cioè caratterizzato da  $V_s \ll 800$  m/s, affiorante si devono usare la seguente tabella

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
F.A. PGA					1.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1
F.A. SI1					1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2
F.A. SI2					1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3

Fattori di Amplificazione **PGA**, **SI1** e **SI2**

## A2.1.2 - PIANURA PADANA E COSTA ADRIATICA

Per questi ambienti sono state individuate le seguenti tipologie:

**PIANURA 1:** 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 contrasto di impedenza significativo, tale da essere considerato coincidente con il tetto del substrato rigido, a profondità  $\leq 100$  m da p.c.;

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5
F.A. SI1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5
F.A. SI2	3.0	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1
F.A. SI3	3.4	3.2	2.8	2.5	2.2	2.0

Pianura 1. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA, SI1, SI2 e SI3**.

**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.;

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5
F.A. SI1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6
F.A. SI2	3.1	3.0	2.7	2.4	2.1	2.0
F.A. SI3	3.6	3.3	2.9	2.5	2.2	2.0

Pianura 2. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA, SI1, SI2 e SI3**.

**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 inferiori a 300 m da p.c.;

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.3	1.3	1.3			
F.A. SI1	1.5	1.5	1.5			
F.A. SI2	2.3	2.3	2.2			
F.A. SI3	2.6	2.6	2.4			

Pianura 3. Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA, SI1, SI2 e SI3**.

MARGINE: settore di transizione tra la zona collinare (Appennino) e la pianura caratterizzato da terreni prevalentemente fini sovrastanti orizzonti grossolani (ghiaie, ghiaie sabbiose); il substrato geologico è generalmente costituito da sabbie marine pleistoceniche o da peliti plio-pleistoceniche (substrato non rigido); questo settore è suddiviso in:

MARGINE di tipo A: caratterizzato da spessore dei terreni fini sovrastanti gli orizzonti grossolani inferiore a 30 m; gli strati grossolani sovrastano direttamente il substrato geologico;

	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		

Fattori di Amplificazione **PGA**. Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

	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		

Fattori di Amplificazione **SI1** ( $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$ ). Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

	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		

Fattori di Amplificazione **SI2** ( $0.1s \leq T_0 \leq 0.5s$ ). Colonna 1  $H$  (m), riga 1  $V_{sH}$  (m/s)

MARGINE di tipo B: caratterizzato da spessore dei terreni fini superiore a 30 m; gli strati grossolani sovrastano altri strati di terreni fini presenti fino al substrato;

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5
F.A. SI1	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6
F.A. SI2	2.9	2.8	2.5	2.3	2.1	2.0
F.A. SI3	3.3	3.1	2.7	2.4	2.2	2.0

Margine settore B: Tabella dei Fattori di Amplificazione **PGA, SI1, SI2 e SI3**.

## A2.2 - Effetti della topografia

Gli effetti topografici possono essere trascurati per pendii con inclinazione media inferiore a  $15^\circ$ . 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  $15^\circ$  la risposta sismica locale deve essere incrementata di un fattore  $S_T$  (coefficiente di amplificazione topografica) che può essere calcolato nel seguente modo (v. figura 1):

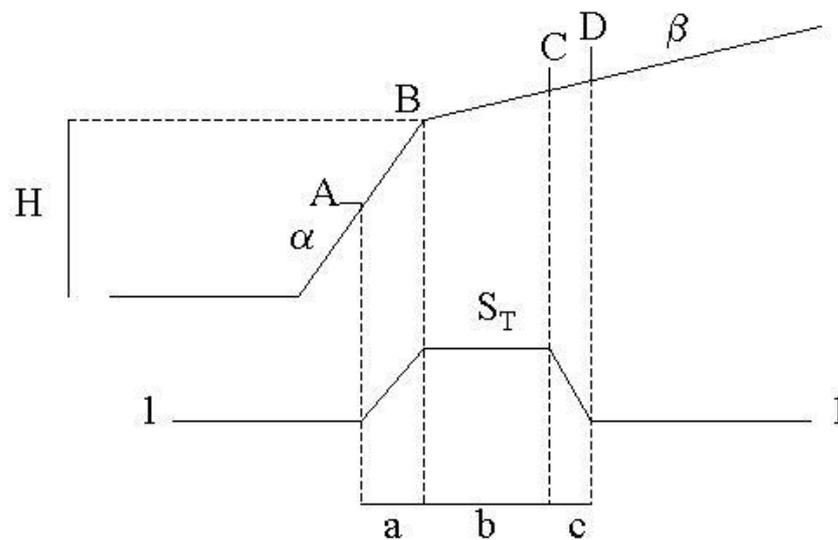


Figura 1

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

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

$\alpha$  e  $\beta$  sono i gradienti della parte più ripida e meno ripida, rispettivamente:

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

$S_T$ : si impone comunque un valore compreso tra 1 e 1.4.

## 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  $z_{\text{crit}}$  da piano campagna (di norma si assume  $z_{\text{crit}} = 20\text{m}$ ), 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 susceptibili 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 con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:
  - frazione di fine<sup>1</sup>, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità  $I_p > 10\%$ ;
  - $FC \geq 35\%$  e resistenza  $(N_1)_{60} > 20$  oppure  $q_{c1N} > 95$  oppure  $V_{S1} > 200$  m/s;
  - $FC \leq 5\%$  e resistenza  $(N_1)_{60} > 25$  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:

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

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

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

essendo  $p_a$  la pressione atmosferica e  $\sigma'_{v0}$  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.

---

<sup>1</sup> La frazione 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:

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

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

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

$MSF$  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  $CRR$ ,

$K_\sigma$  è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata

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

taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale  $\sigma'_{v0}$ , ove  $a_{max\ s}$  è il picco di accelerazione al piano campagna,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\sigma_{v0}$  e  $\sigma'_{v0}$  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 (Boulanger 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)<sub>60cs</sub> è definito al punto 2 e m è determinato per via iterativa; per prove eseguite secondo le raccomandazioni AGI (1977): C<sub>E</sub> = C<sub>B</sub> = C<sub>R</sub> = C<sub>S</sub> ≅ 1; p<sub>a</sub> 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)

$$3. CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm} = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left[ \frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right]^2 - \left[ \frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right]^3 + \left[ \frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right\}$$

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

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right)^2 \leq 2.2$$

$$5. K_s = 1 - C_\sigma \cdot \ln \left( \frac{\sigma'_v}{p_a} \right) \leq 1.1$$

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

$$6. CSR_{M; \sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

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

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

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

$$7. F_L = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm}}{CSR_{M; \sigma'_v}} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

La curva CRR – (N<sub>1</sub>)<sub>60cs</sub> è mostrata in Figura 2a

A2.2 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).

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.

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

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

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

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

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

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

FC è il contenuto di fine espresso in %. In assenza di determinazione sperimentale di laboratorio FC può essere stimato con l'espressione empirica:

$$FC = 80 I_c - 137$$

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

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \cdot 100$$

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

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

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

$$\text{MSF}_{\max} = 1.09 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{180} \right)^3 \leq 2.2$$

$$5. \text{ K}_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.1$$

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

$$5. \text{ CSR}_{M;\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{a_{\max s}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

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

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

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

$$6. F_L = \frac{\text{CRR}_{M=7.5;\sigma'_v=1atm}}{\text{CSR}_{M;\sigma'_v}} \cdot \text{MSF} \cdot \text{K}_{\sigma}$$

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

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

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

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

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

$$3. CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

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

$$4. F_L = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF$$

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

$$1. V_{s1} = V_s \cdot C_V$$

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

$$2. CRR = \left[ 0.022 \cdot \left(\frac{V_{s1}}{100}\right)^2 + 2.8 \cdot \left(\frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*}\right) \right]$$

$$FC \leq 5\% \Rightarrow V_{s1}^* = 215 \text{ m/s}$$

$$5\% < FC < 35\% \Rightarrow V_{s1}^* = 215 - 0.5 \cdot (FC - 5)$$

$$FC \geq 35\% \Rightarrow V_{s1}^* = 200 \text{ m/s}$$

$$3. \quad MSF = \left( \frac{M}{7.5} \right)^{-2.56}$$

$$4. \quad CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{\max s}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

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

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

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

$$5. \quad F_L = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF$$

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  $\varepsilon_{vi}$  è la deformazione volumetrica (e verticale)

dello strato i-esimo e  $\Delta z_i$  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 molli 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)  $\varepsilon_v$  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,  $\varepsilon_v$  (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  $\gamma_{max}$  (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  $G$  è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo  $\gamma$ , 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 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  $\Delta s$  è il cedimento dello strato di spessore  $\Delta z$ ,

$\varepsilon_{Nc} = \varepsilon_{15} \cdot \left( \frac{N_c}{15} \right)^{0.45}$  è la deformazione volumetrica per un numero di cicli equivalente  $N_c$  il cui valore è funzione della magnitudo del terremoto 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  $\gamma$ ,

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

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

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

$G$  è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo  $\gamma$ , 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 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):

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

$G_0$  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,

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

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

$G$  è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo  $\gamma_{\max}$ , 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 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))<sup>2</sup>.

$\gamma_v$  è la deformazione di soglia volumetrica, determinabile con prove dinamiche di laboratorio, o in prima approssimazione con la relazione empirica (Matsui et al. 1980):  $\gamma_v = A \cdot (\text{OCR} - 1) + B$  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	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

<sup>2</sup> Il valore della deformazione di taglio massima  $\gamma_{\max}$  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 sismiche<sup>3</sup>, 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  $K_\alpha$  che dipende:

dal rapporto  $\alpha$  fra la tensione di taglio iniziale agente sul piano di interesse e la tensione

verticale efficace di consolidazione:  $\alpha = \frac{\tau_{st}}{\sigma_{vc}}$

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  $K_\alpha$  è calcolato con la seguente relazione (Idriss e Boulanger, 2008):

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

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

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

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

valida per  $\alpha \leq 0.35$  e  $-0.6 \leq \xi_R \leq 0.1$

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

---

<sup>3</sup> È importante sottolineare che in condizioni sismiche i volumi di frana non sono uguali a quelli che si hanno in condizioni statiche

**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 sismiche può produrre effetti critici sulle sovrastanti costruzioni o nell'area circostante.

L'analisi può essere condotta con metodi pseudostatici e, nei pendii coesivi a comportamento duttile (indice di consistenza  $I_c < 0.5$ , grado di sovraconsolidazione  $OCR < 5$ , indice di plasticità  $I_p > 26\%$ ), anche con metodi dinamici semplificati<sup>4</sup>.

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.

Particolare attenzione deve essere data alla determinazione della resistenza di picco e residua, in condizioni drenate e non drenate. Si devono assumere:

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

Nei pendii saturi occorre effettuare una stima iniziale delle pressioni interstiziali durante il terremoto in corrispondenza di alcune verticali significative e a varie profondità. Il rapporto di pressione interstiziale può essere valutato in modo approssimato con le espressioni riportate nel paragrafo B).

---

<sup>4</sup> 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  $\phi$  è l'angolo di resistenza al taglio sul piano di slittamento,  $\alpha$  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:

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

$a_{\max}$  = 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

Nei terreni coesivi saturi, 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  $\sigma'_{v0}$  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  $\delta$  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). Se si dispone di un accelerogramma di riferimento per il sito, il numero di cicli  $N$  può essere valutato calcolando numero di semi-incroci con l'asse dei tempi della fase pseudo-stazionaria dell'accelerogramma, ovvero dell'intervallo di tempo compreso tra il primo e l'ultimo superamento di una prefissata soglia di accelerazione, generalmente assunta pari a 0.05g.

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):

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

$\gamma$  è la deformazione di taglio ciclica efficace indotta dal terremoto, determinabile, 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  $G$  (modulo di taglio corrispondente al livello deformativo  $\gamma$ ) 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 di

laboratorio o, in modo approssimato, desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4)<sup>5</sup>.

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

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

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

### CI. 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  $W$ , pari 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.

Si devono assumere i seguenti valori:  $K_h = \beta_s \cdot a_{\max s} / g$ , in direzione orizzontale, e  $K_v = \pm 0.5 \cdot K_h$ , in direzione verticale, essendo  $a_{\max s}$  l'accelerazione massima (in g) al piano campagna attesa al sito,  $\beta_s$  un coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima e  $g$  l'accelerazione di gravità. I valori di  $\beta_s$  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 Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008)

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

	<b>A</b>	<b>B, C, D, E</b>
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g/g < 0.4$	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

È da notare che 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  $\text{OCR} < 5$ , indice di plasticità  $I_p > 26$ ) devono essere effettuate 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 letteratura.

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

## 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 (2008) – Le Norme Tecniche per le Costruzioni. D.M. 14 gennaio 2008, *G.U. 29, Suppl. ord. n. 30*
- 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., 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.

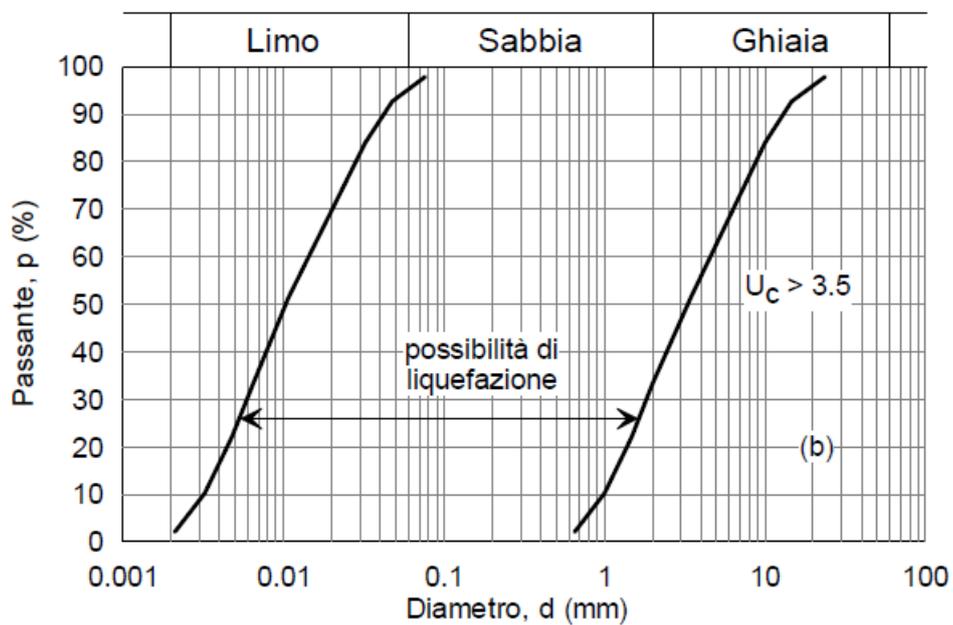
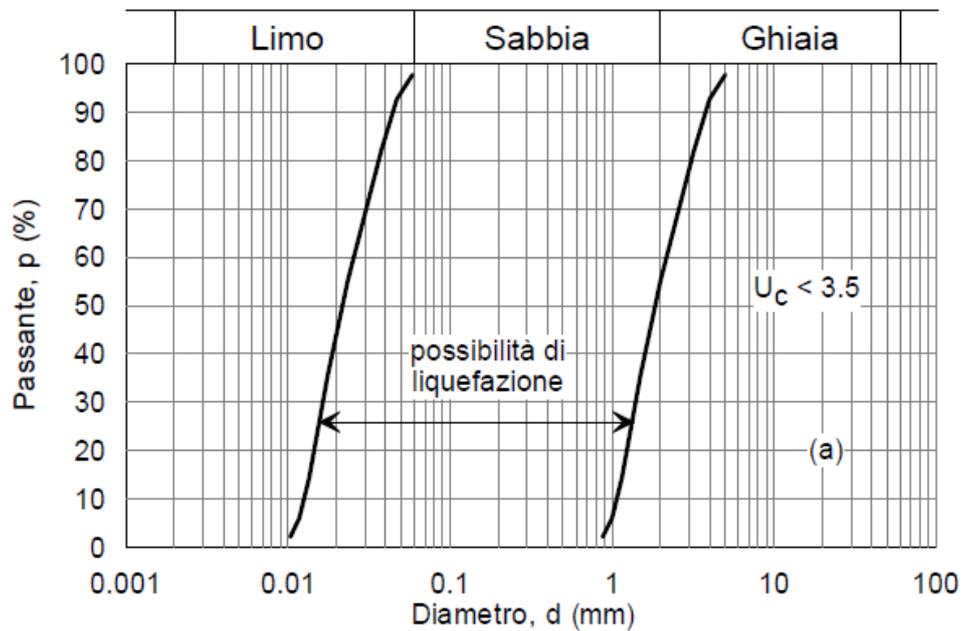
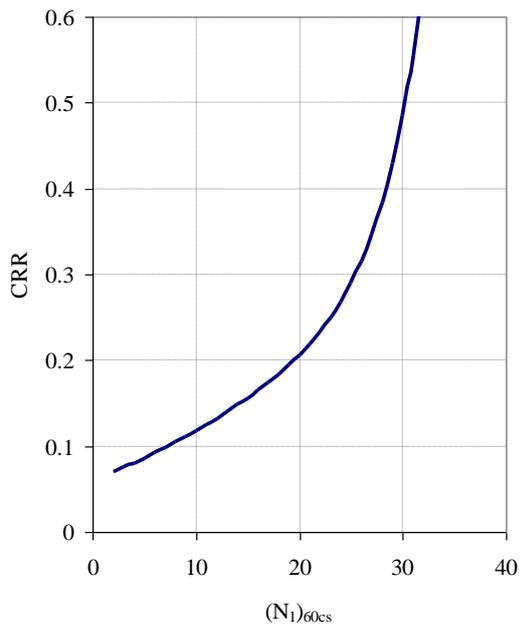
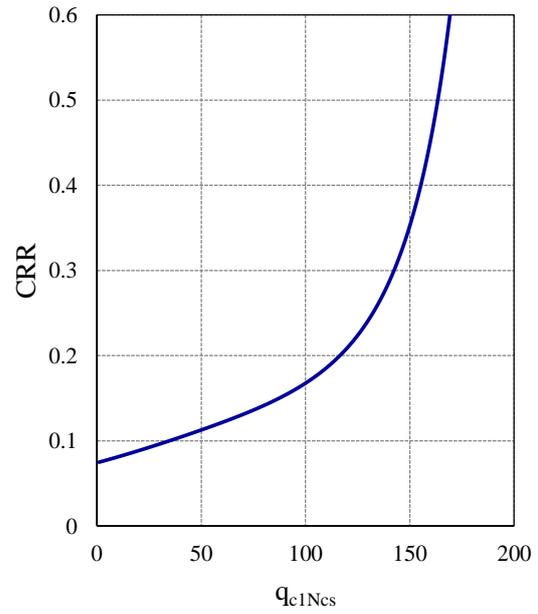


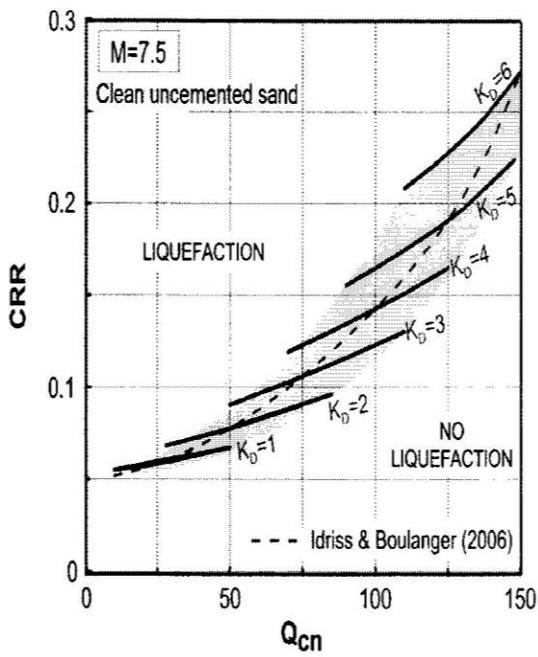
Figura 1 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione di terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (AGI, 2005)



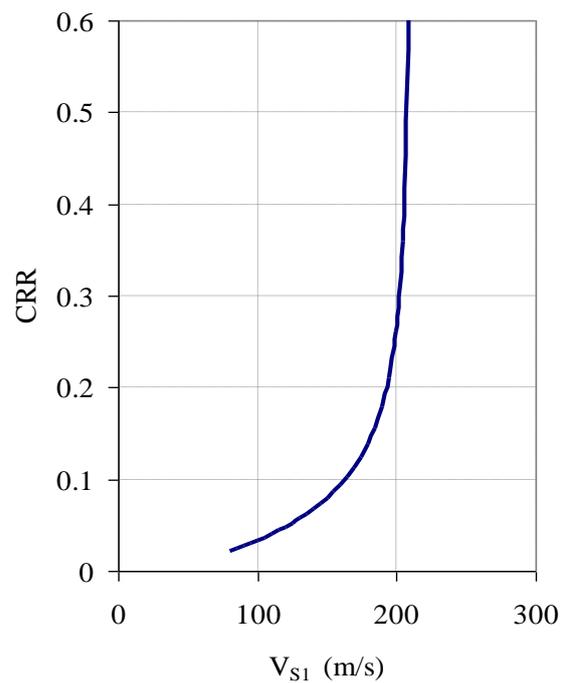
(a)



(b)



(c)



(d)

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)

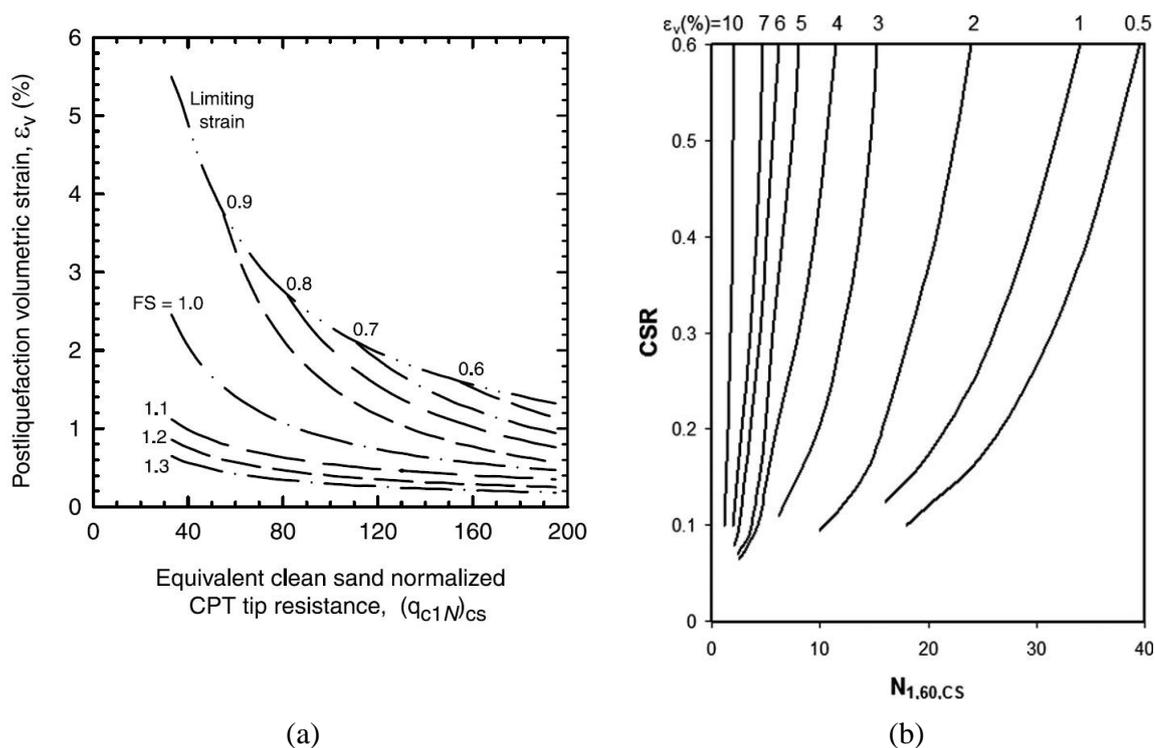


Figura 3 - Carte per la stima delle deformazioni volumetriche indotte dall'azione sismica nei terreni granulari saturi sulla base dei risultati di prove CPT (a) (Zhang et al., 2002), e SPT (b) (Wu e Seed, 2004)

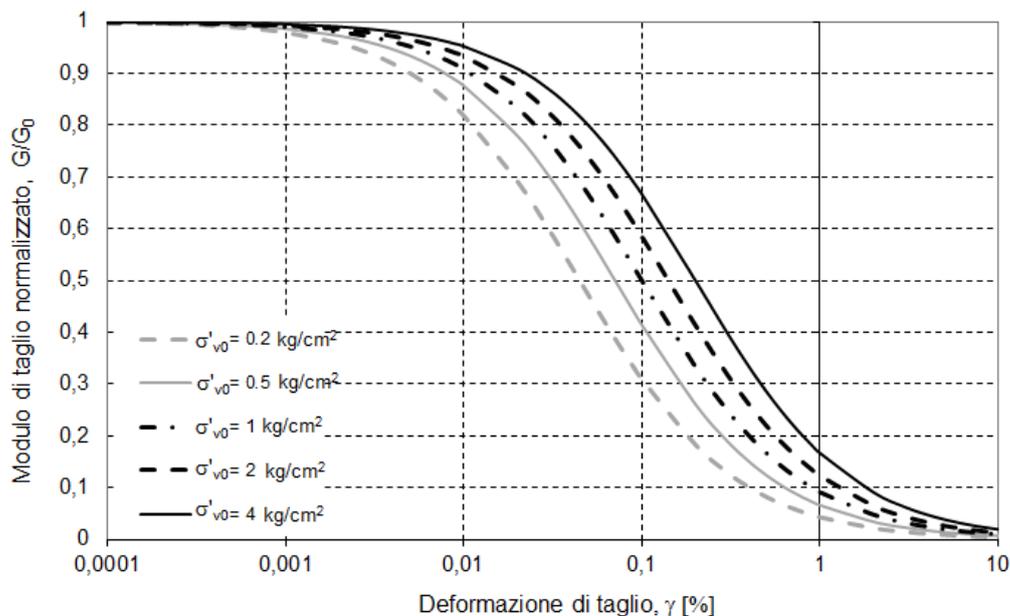


Figura 4 – Curve  $G/G_0 - \gamma$  di letteratura per sabbie (AGI, 2005)

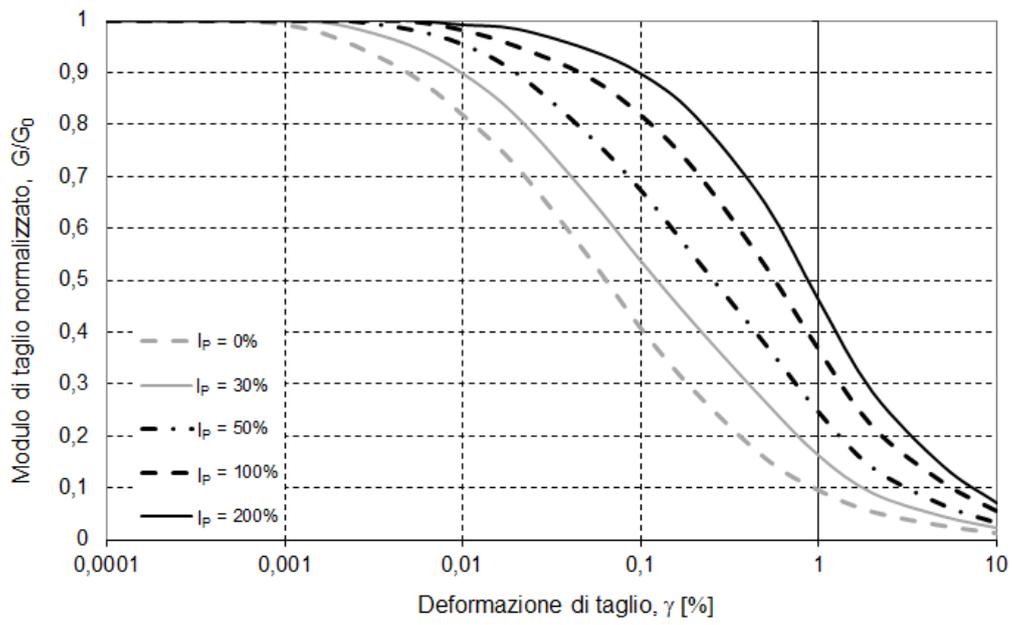


Figura 5 – Curve  $G/G_0 - \gamma$  di letteratura per terreni a grana fine (AGI, 2005)

## SIMBOLI E ACRONIMI

a	coefficiente
A	coefficiente
a	coefficiente funzione di $\alpha$
$a_c$	accelerazione critica
$a_{gR}$	accelerazione orizzontale di picco su roccia o terreno rigido di riferimento
$a_{max s}$	accelerazione massima al piano campagna
b	coefficiente
B	coefficiente
b	coefficiente funzione di $\alpha$
c	coefficiente funzione di $\alpha$
CB	coefficiente di correzione dell'indice $N_{SPT}$ per dimensioni del foro
CE	coefficiente di correzione dell'indice $N_{SPT}$ per rendimento energetico ER
CH	prova Cross-Hole
CN	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
CR	coefficiente di correzione dell'indice $N_{SPT}$ per lunghezza delle aste
$C_r$	indice di ricompressione edometrico
CRR	rapporto di resistenza ciclica
CS	coefficiente di correzione dell'indice $N_{SPT}$ per campionatore 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
CV	coefficiente di normalizzazione di $V_s$ per tensioni litostatiche
$C_\sigma$	coefficiente funzione di $(N_1)_{60}$
DH	prova Down-Hole
DMT	prova dilatometrica
DR	densità relativa
$e_0$	indice di vuoti iniziale
ER	rendimento energetico dell'attrezzatura per prova SPT
F	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

$K_{Dcs}$	valore equivalente di $K_D$ per sabbie pulite
$K_h$	coefficiente sismico orizzontale
$K_v$	coefficiente sismico verticale
$K_\alpha$	fattore di correzione di $F_L$ nei terreni in pendio per tensione di taglio statica iniziale
$K_\sigma$	fattore di correzione per tensioni efficaci
$M$	magnitudo
$MSF$	fattore di scale 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
$N_{SPT}$	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
$\Delta h$	spessore di uno strato di terreno granulare insaturo
$\Delta q_{c1N}$	incremento di $q_{c1N}$ per FC
$\Delta s$	cedimento indotto dall'azione sismica nello strato di spessore $\Delta h$
$\Delta u$	incremento di pressione interstiziale
$\Delta z_i$	spessore dello strato $i$ -esimo
$\alpha$	angolo di inclinazione della superficie di scorrimento
$\alpha$	coefficiente funzione di $(N_1)_{60}$
$\alpha$	coefficiente funzione di $q_{c1N}$
$\alpha$	rapporto fra $\tau_{st}$ e $\sigma'_{n0}$
$\alpha(z)$	coefficiente funzione di $z$

$\beta(z)$	coefficiente funzione di z
$\delta$	coefficiente di degradazione ciclica
$\epsilon_{15}$	deformazione volumetrica dopo 15 cicli
$\epsilon_{N_c}$	deformazione volumetrica per $N_c$ cicli equivalenti
$\epsilon_v$	deformazione volumetrica
$\epsilon_{v_i}$	deformazione volumetrica dello strato i-esimo
$\phi$	angolo di resistenza al taglio
$\gamma$	deformazione di taglio ciclica
$\gamma_1$	coefficiente di importanza
$\gamma_{max}$	deformazione di taglio massima indotta dall'azione sismica di riferimento
$\gamma_v$	deformazione di soglia volumetrica
$\sigma'_{n0}$	tensione efficace normale iniziale in un pendio
$\sigma'_{v0}$	tensione verticale efficace iniziale
$\sigma_{v0}$	tensione verticale totale iniziale
$\tau_{max}$	tensione di taglio ciclica massima indotta dall'azione sismica di riferimento
$\tau_{media}$	tensione di taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento
$\tau_{st}$	tensione di taglio statica iniziale in un pendio
$\tau_{ult}$	tensione di taglio resistente per terremoto di magnitudo $M = 7.5$
$\xi_R$	parametro di stato

## 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.II delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, 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 INGV<sup>1</sup>
- i valori di  $a_{refg}$ , ovvero dell'accelerazione massima orizzontale, 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 INGV<sup>2</sup>
- indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati.

### 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.

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 ( $a_{ref}$ ).

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>

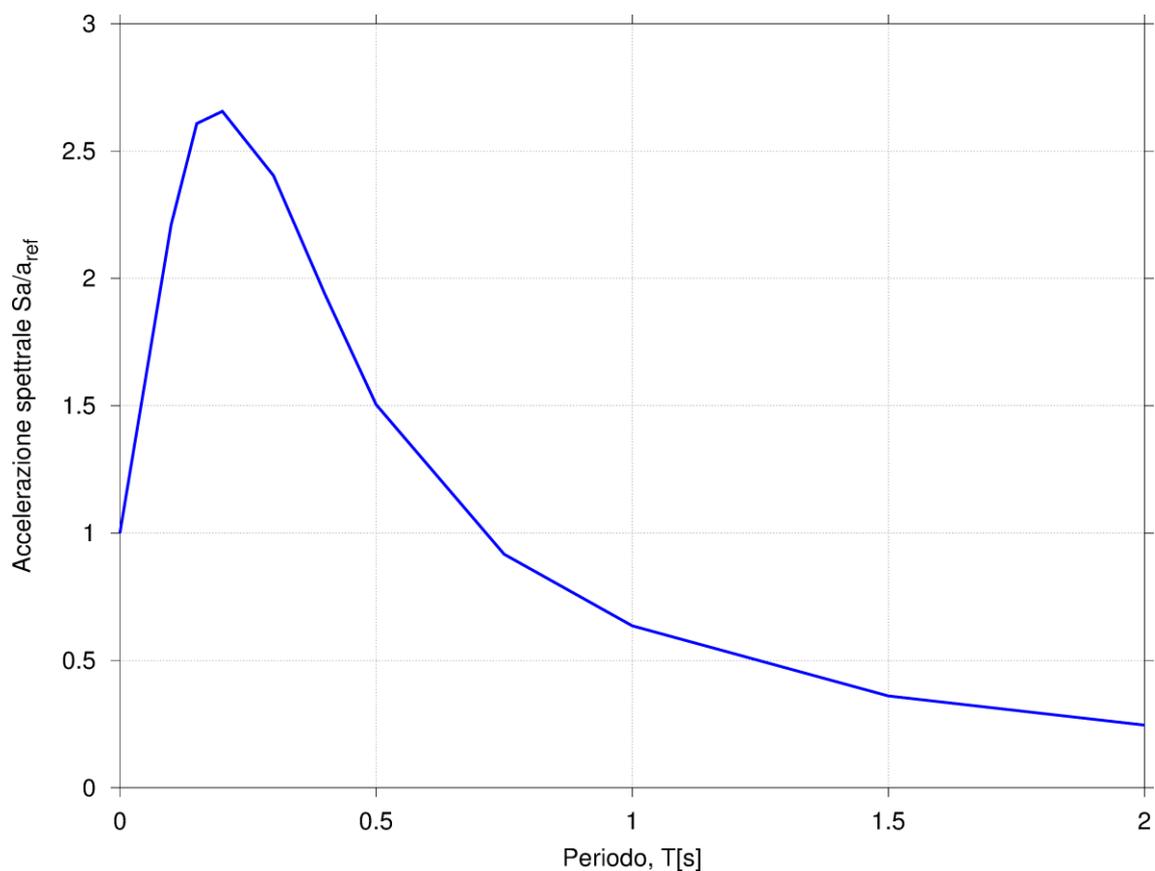


Figura 1: Spettro di risposta normalizzato (Periodo di ritorno: 475 anni, smorzamento: 5%) per l'Emilia-Romagna

T(s)	$S_a/a_{ref}$
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](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 dei files corrisponde al codice identificativo ISESD delle registrazione accelerometriche. 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 dei files) per il valore di  $a_{refg}$  ottenuto con la procedura descritta nel precedente paragrafo.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Atti amministrativi

GIUNTA REGIONALE

Enrico Cocchi, Direttore generale della DIREZIONE GENERALE PROGRAMMAZIONE TERRITORIALE E NEGOZIATA, INTESE. RELAZIONI EUROPEE E RELAZIONI INTERNAZIONALI esprime, ai sensi dell'art. 37, quarto comma, della L.R. n. 43/2001 e della deliberazione della Giunta Regionale n. 2416/2008 e s.m.i., parere di regolarità amministrativa in merito all'atto con numero di proposta GPG/2015/2381

data 17/12/2015

IN FEDE

Enrico Cocchi

REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Atti amministrativi

GIUNTA REGIONALE

Giuseppe Bortone, Direttore generale della DIREZIONE GENERALE AMBIENTE E DIFESA DEL SUOLO E DELLA COSTA esprime, ai sensi dell'art. 37, quarto comma, della L.R. n. 43/2001 e della deliberazione della Giunta Regionale n. 2416/2008 e s.m.i., parere di regolarità amministrativa in merito all'atto con numero di proposta GPG/2015/2381

data 17/12/2015

IN FEDE

Giuseppe Bortone

omissis

---

L'assessore Segretario: Costi Palma

---

Il Responsabile del Servizio

Affari della Presidenza