

## 5. Il Rischio Sismico

Le azioni sismiche attese in un certo sito si prevedono, su base probabilistica, tramite la pericolosità sismica che è funzione delle caratteristiche di sismicità regionali e del potenziale sismogenetico delle sorgenti sismiche; la valutazione della pericolosità sismica porta poi alla valutazione del rischio sismico di un sito in termini di danni attesi a cose e persone come prodotto degli effetti di un evento sismico.

La pericolosità sismica valutata all'interno di un sito deve essere stimata come l'accelerazione orizzontale massima al suolo in un dato periodo di tempo, definendo i requisiti progettuali antisismici per le nuove costruzioni nel sito stesso.

### 5.1 Normativa nazionale

#### OPCM 20 marzo 2003

Sulla base del documento *Proposta di riclassificazione sismica del territorio nazionale* elaborato dal Gruppo di Lavoro costituito dalla Commissione Naz. Di Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi (23 aprile 1997) e successive precisazioni, sono state individuate in tutto il territorio nazionale 4 zone sismiche, secondo valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo ( $a_g$ ) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni. La valutazione di  $a_g$  è stata calcolata con metodologie internazionali aggiornate periodicamente con procedure trasparenti e riproducibili.

La zonizzazione sismica dell'intero territorio nazionale è stata effettuata secondo l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/03 pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8/05/03 Supplemento Ordinario n. 72: *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Costituiscono parte integrante dell'ordinanza:

- ❖ Allegato 1 - *Criteri per l'individuazione delle zone sismiche – individuazione, formazione e aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*
- ❖ Allegato 2 - *Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici*
- ❖ Allegato 3 - *Norme tecniche per il progetto sismico dei ponti*
- ❖ Allegato 4 - *Norme tecniche per il progetto sismico di opere di fondazioni e di sostegno dei terreni.*

Secondo questa zonizzazione (vedasi figura di seguito riportata) tutto il territorio comunale di Milano si trova in **zona 4** (colore verde), cioè nella zona, tra quelle individuate, di minor rischio sismico.

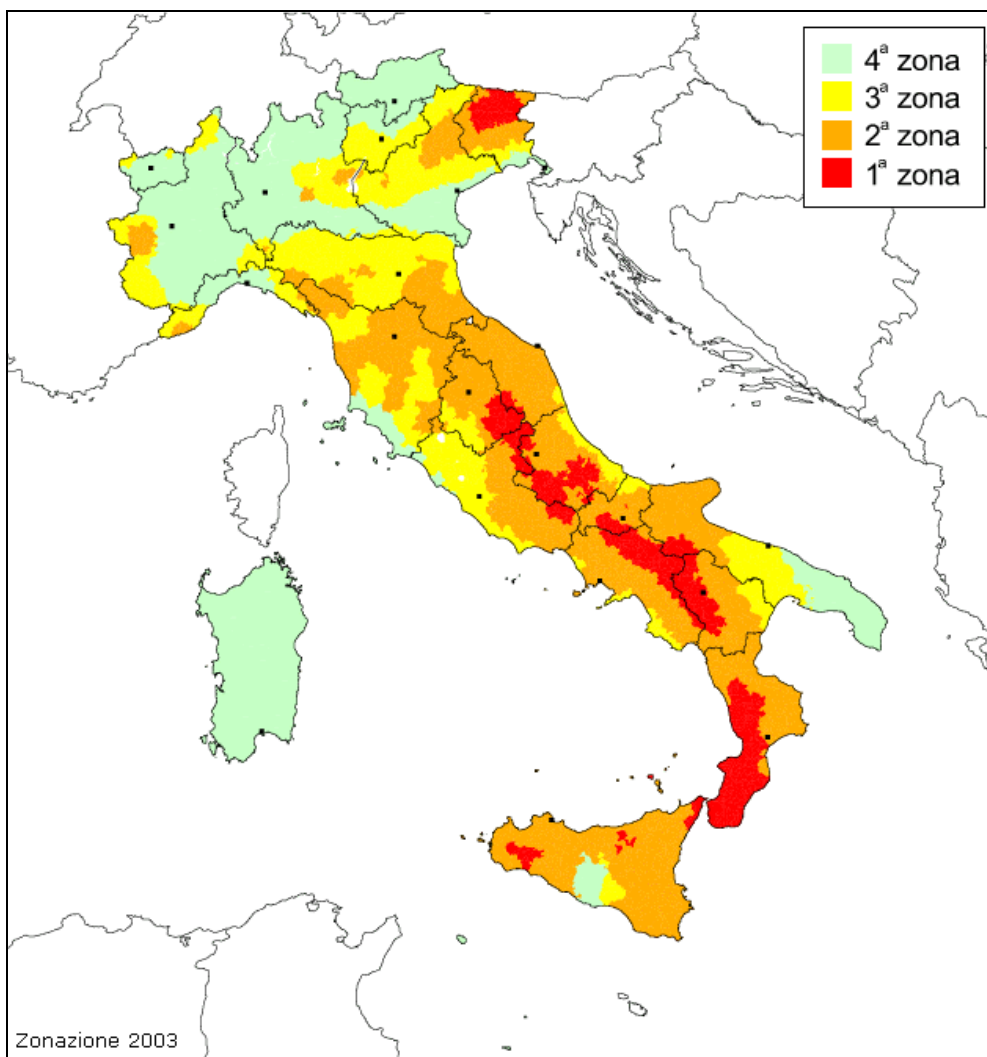


Fig 5.1: Proposta di riclassificazione sismica del territorio nazionale, 2003 (da INGV)

### **OPCM 28 aprile 2006**

L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28/04/06 pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'11/05/06 Serie Generale Anno 147° - n. 108 (*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*) adotta come riferimento ufficiale una nuova mappa di pericolosità sismica e definisce i criteri generali per la classificazione delle zone sismiche. Costituiscono parte integrante dell'ordinanza:

- ❖ Allegato 1A - *Criteri per l'individuazione delle zone sismiche e la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*
- ❖ Allegato 1B - *Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale.*

La mappa, riportata nell'Allegato 1B (vedasi figura di seguito riportata), rappresenta graficamente la pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima del suolo ( $a_g$ ), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli rigidi caratterizzati da  $V_{s30} > 800$  m/s.

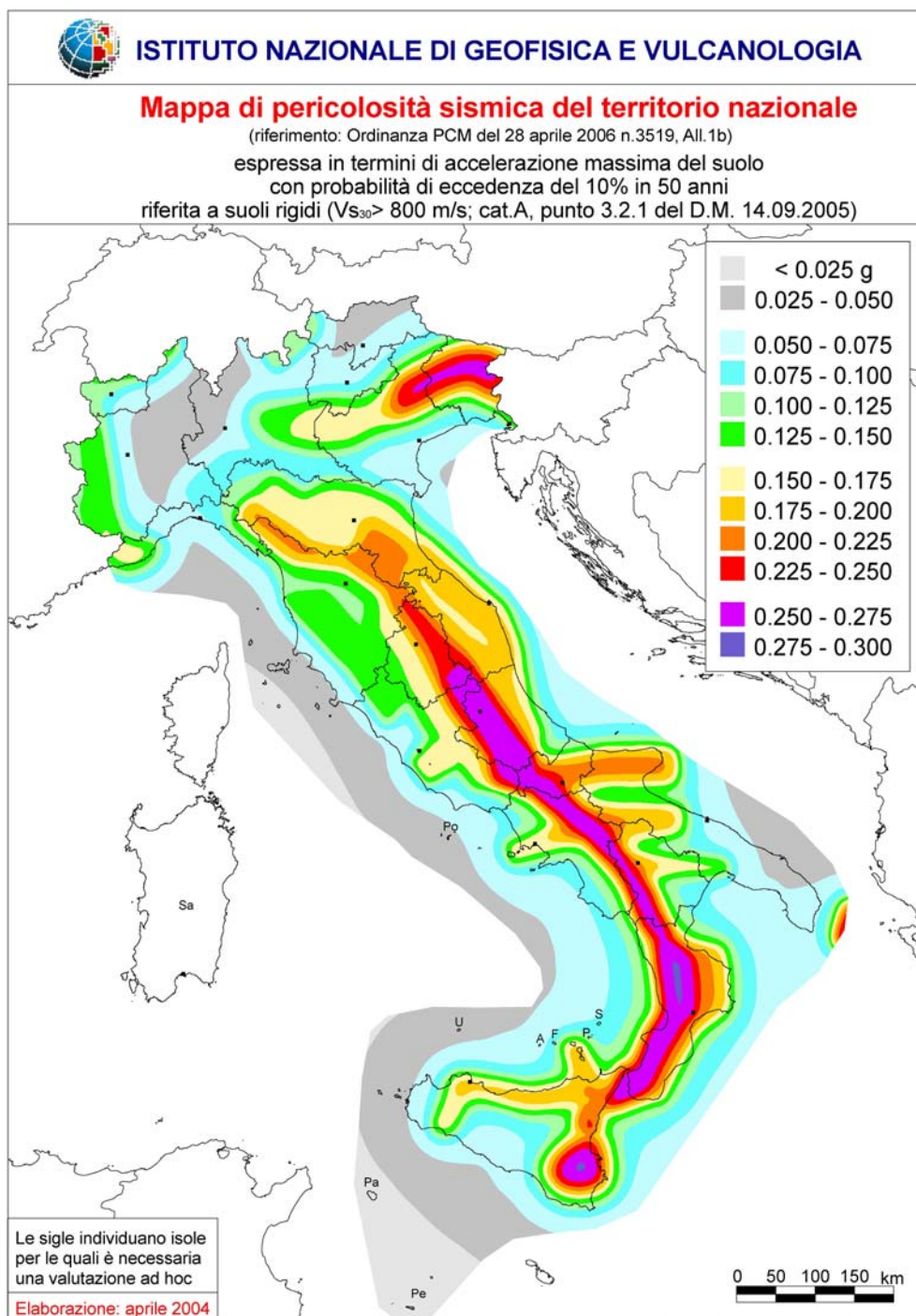


Fig 5.2: Proposta di riclassificazione sismica del territorio nazionale (da INGV)

Secondo questa mappa il territorio comunale di Milano è caratterizzato in parte da un valore di  $a_g$  classificabile come zona 4 (porzione occidentale color grigio) ed in parte da un valore di  $a_g$  classificabile come zona sismica 3 (porzione orientale color azzurro). L'area della stazione di S. Cristoforo si trova nella porzione sud-occidentale del territorio comunale di Milano e ricade in **zona 4** perché caratterizzata da un valore di  $a_g \leq 0.05$  g (vedasi Allegato 1A della OPCM 3519/2006).

### **D.M. 14 gennaio 2008**

Dal 1° luglio 2009 la progettazione antisismica in Italia, per tutte le zone sismiche e per tutte le tipologie di edifici sarà regolata dal D.M. 14/01/08.

Il D.M. 14 gennaio 2008 (*Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*), pubblicato sulla G.U. n. 29 del 04/02/08, in vigore dal 5 marzo 2008, sostituisce il precedente D.M. 14 settembre 2005, fatto salvo il periodo di monitoraggio di 18 mesi di cui al comma 1 dell'art. 20 della L. 28 febbraio 2008, n. 31.

Queste nuove Norme Tecniche per le Costruzioni definiscono i criteri definitivi per la classificazione sismica del territorio nazionale in recepimento del Voto 36 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici del 27 luglio 2007 (*Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale*); tali criteri prevedono la valutazione dell'azione sismica definita puntualmente al variare del sito e del periodo di ritorno considerati, in termini di accelerazione del suolo  $a_g$  e di forma dello spettro di risposta. Costituiscono parte integrante del decreto:

- Allegato A - *Pericolosità sismica*
- Allegato B - *Tabelle dei parametri che definiscono l'azione sismica.*

Diversamente dalla precedente normativa l'azione sismica non viene più valutata riferendosi ad una zona sismica (territorialmente coincidente con più entità amministrative), ad un'unica forma spettrale e ad un periodo di ritorno prefissato ed uguale per tutte le costruzioni, ma viene valutata sito per sito e costruzione per costruzione.

Secondo l'allegato A l'azione sismica sulle costruzioni viene valutata a partire da una pericolosità sismica di base in condizioni ideali di sito di riferimento rigido (categoria di sottosuolo A) con superficie topografica orizzontale (categoria T1).

La pericolosità sismica in un generico sito deve essere descritta con sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali; i risultati dello studio di pericolosità devono essere forniti:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopra definite;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km);
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata in funzione delle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo e morfologiche della superficie; tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale.

La pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento è fornita dai dati pubblicati sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

Le azioni sismiche di progetto si ricavano dalle accelerazioni del suolo  $a_g$  e dalle relative forme dello spettro di risposta. Le forme spettrali previste dalle NTC sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno;

- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_C^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno  $T_R$  considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano riferendosi ai valori corrispondenti al 50esimo percentile ed attribuendo a:

- $a_g$  il valore previsto dalla pericolosità sismica
- $F_0$  e  $T_C^*$  i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica (la condizione di minimo è imposta operando ai minimi quadrati, su spettri di risposta normalizzati ad uno, per ciascun sito e ciascun periodo di ritorno).

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite di riferimento. A tal fine occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione,
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione al periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  (definita al paragrafo 2.4.1 e in Tabella 2.4.I del D.M. 14/01/08) per il coefficiente d'uso  $C_U$ :

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso è definito, al variare della classe d'uso (definita al paragrafo 2.4.2 del D.M. 14/01/08), come riportato in Tabella 2.4.II del D.M. 14/01/08.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$  cui riferirsi per individuare l'azione sismica in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate in Tabella 3.2.I del D.M. 14/01/08.

Per individuare, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche, per tutte le vite di riferimento e tutti gli stati limite considerati dalle NTC, è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ , espresso in anni. Fissata la vita di riferimento  $V_R$ , i due parametri  $T_R$  e  $P_{VR}$  sono immediatamente esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante l'espressione:

$$T_R = - V_R / \ln (1 - P_{VR})$$

Le tabelle dell'allegato B riportano i valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$  relativi alla pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento (pubblicati anche sul sito <http://essel.mi.ingv.it/>).

Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del *reticolo di riferimento*, i valori dei parametri  $p$  ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$ ) di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto (come indicato nell'Allegato A al D.M. 14/01/08) possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del *reticolo di riferimento* contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

La pericolosità sismica di base dell'area di studio viene espressa in funzione dell'accelerazione orizzontale massima  $a_g$ , nelle condizioni di sito di riferimento rigido



orizzontale, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, come riportato nella figura seguente (tratta dalla pagina <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>).

Si sottolinea che l'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  in queste mappe è espressa come frazione dell'accelerazione di gravità ( $g$ ), nelle tabelle dell'allegato B invece essa non è espressa come frazione di  $g$ , pertanto, assumendo come valore di  $g$  una cifra pari a circa 10 (esattamente  $9.81 \text{ m/s}^2$ ) i valori di  $a_g$  riportati sulle mappe differiscono di circa 1 ordine di grandezza da quelli riportati nelle tabelle.

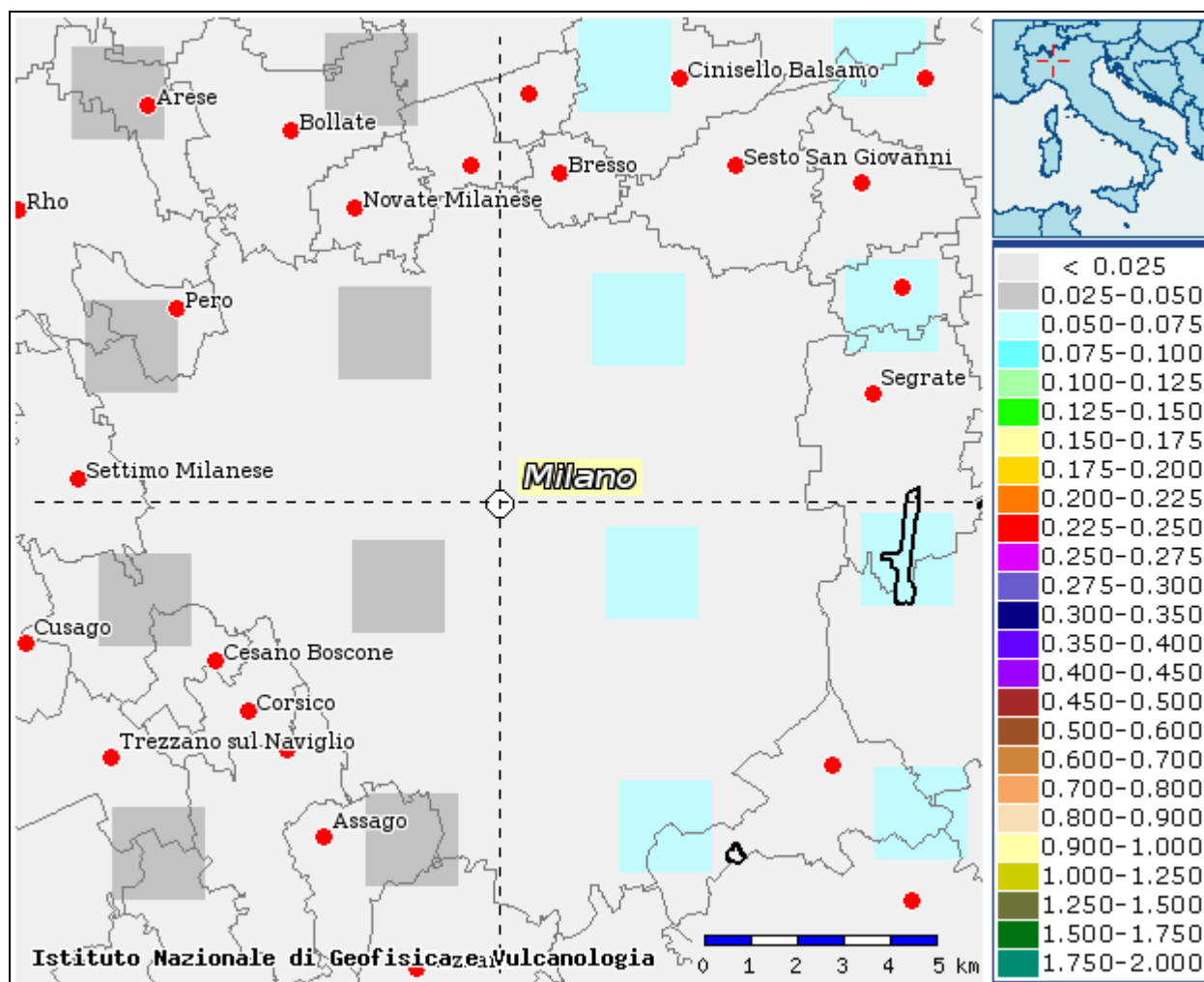


Fig 5.3: Nodi di riferimento per il Comune di Milano per la definizione dei parametri  $p$

Le coordinate del centro del comune di Milano (considerato il centro della mappa sopraportata) sono: Latitudine = 45.474, Longitudine = 9.175.

Di seguito si riportano le coordinate dei quattro nodi di riferimento utilizzabili per la definizione dei valori dei parametri  $p$  ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ ) per l'area della stazione di S. Cristoforo.

Tabella 5.1

ID	Latitudine	Longitudine
12259	45.4542	9.0752
12260	45.4568	9.1463

12481	45.4043	9.0788
12482	45.4068	9.1499

Nel nodo 12259 (ubicato nella porzione occidentale del territorio comunale di Milano) i parametri che permettono di definire gli spettri di risposta, per i periodi di ritorno indicati, assumono i seguenti valori, così come riportato nelle tabelle dell'Allegato B.

Tabella 5.2

$T_R$	$\alpha_g$	$F_o$	$T_c^*$
30	0.177	2.55	0.16
50	0.222	2.53	0.19
72	0.258	2.59	0.20
101	0.292	2.59	0.21
140	0.324	2.61	0.22
201	0.358	2.64	0.24
475	0.451	2.68	0.28
975	0.540	2.72	0.30
2475	0.668	2.84	0.32

Nel nodo 12260 (ubicato nella porzione centro-occidentale del territorio comunale di Milano)

Tabella 5.3

$T_R$	$\alpha_g$	$F_o$	$T_c^*$
30	0.185	2.55	0.16
50	0.234	2.54	0.19
72	0.272	2.58	0.20
101	0.306	2.58	0.22
140	0.340	2.60	0.23
201	0.375	2.63	0.25
475	0.479	2.67	0.28
975	0.574	2.71	0.30
2475	0.718	2.81	0.32

Nel nodo 12481 (ubicato in territorio comunale di Zibido San Giacomo)

Tabella 5.4

$T_R$	$\alpha_g$	$F_o$	$T_c^*$
30	0.182	2.55	0.16
50	0.229	2.53	0.19
72	0.265	2.59	0.20
101	0.300	2.58	0.21
140	0.333	2.60	0.23
201	0.368	2.63	0.25
475	0.467	2.67	0.28
975	0.560	2.71	0.30
2475	0.696	2.82	0.32

Nel nodo 12482 (ubicato in territorio comunale di Assago)

Tabella 5.5

$T_R$	$\alpha_g$	$F_o$	$T_c^*$
30	0.190	2.55	0.16
50	0.241	2.54	0.19
72	0.279	2.57	0.21
101	0.314	2.58	0.22
140	0.348	2.60	0.23
201	0.385	2.62	0.25
475	0.495	2.66	0.28
975	0.592	2.70	0.30
2475	0.746	2.78	0.32

### Categorie di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione delle categorie di sottosuolo di riferimento indicate nella tabella 3.2.II, di cui al punto 3.2.2 *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche*, capitolo 3 *Azioni sulle costruzioni* del D.M. 14/01/2008.

Sono state definite cinque classi di terreni (A, B, C, D, E) identificabili in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s,30}$  di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità. Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, la classificazione può essere effettuata in base ai valori del numero equivalente di colpi della prova penetrometrica dinamica  $N_{SPT}$  nei terreni prevalentemente a grana grossa e della resistenza non drenata equivalente  $c_{u,30}$  nei terreni prevalentemente a grana fina.

Sulla base dei dati geotecnici raccolti per il presente studio, i terreni costituenti il sottosuolo del comune di Milano, per una profondità di 30 m dal p.c., rientrano



mediamente nel profilo stratigrafico individuato con la lettera **C** ovvero: *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s,30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < N_{SPT,30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{u,30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Si sottolinea che la presente valutazione è stata effettuata sulla base di dati stratigrafici di sondaggio e dati geotecnici vari; in fase progettuale, per una corretta valutazione dell'azione sismica di sito, sarà necessario misurare la velocità di propagazione delle onde S (oppure eseguire prove  $N_{SPT}$ ) nei primi 30 m dell'area di studio.

### **Condizioni topografiche**

Il territorio comunale di Milano presenta configurazioni superficiali semplici, pertanto è possibile adottare la classificazione riportata in tabella 3.2.IV, di cui al punto 3.2.2 *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche*.

Sulla base dei dati topografici disponibili e riportati in cartografia, il territorio del comune di Milano rientra mediamente nella categoria **T1** ovvero *Superficie pianeggiante, pendii isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$* .

### **Valutazione dell'azione sismica**

Ai fini della presente norma l'azione sismica è caratterizzata da 3 componenti traslazionali, due orizzontali (X e Y) e una verticale (Z) da considerare tra di loro indipendenti e ortogonali. Nelle Zone 3 e 4 la componente verticale non viene considerata.

Le due componenti che descrivono il moto orizzontale sono caratterizzate dallo stesso spettro di risposta o dalle due componenti accelerometriche orizzontali del moto sismico.

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione è espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore dell'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  su sito di riferimento rigido orizzontale. Sia la forma spettrale che il valore di  $a_g$  variano al variare della probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ .

Quale che sia la probabilità di superamento nel periodo di riferimento considerata, lo spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali è definito dalle espressioni seguenti:

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot [T/T_B + (1/\eta \cdot F_o) \cdot (1 - T/T_B)]$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot (T_C/T)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot (T_C T_D / T^2)$$

dove:

T periodo di vibrazione

$S_e$  accelerazione spettrale orizzontale

S coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione:  $S = S_s \cdot S_T$

$\eta$  fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali  $\xi$  diversi dal 5% mediante la relazione:  $\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0.55$ , dove  $\xi$  (espresso in percentuale) è valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione

- $T_C$  periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante:  $T_C = C_C \cdot T_C^*$
- $T_B$  periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante:  $T_B = T_C / 3$
- $T_D$  periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante, espresso in secondi mediante la relazione:  $T_D = 4.0 \cdot (a_g/g) + 1.6$

Per le componenti orizzontali del moto e per le categorie di sottosuolo di fondazione definite al punto 3.2.2 del D.M. 14/01/2008, la forma spettrale su sottosuolo di categoria A è modificata attraverso il coefficiente stratigrafico  $S_s$ , il coefficiente topografico  $S_T$  e il coefficiente  $C_C$  che modifica il valore del periodo  $T_C$ .

#### Amplificazione stratigrafica

Per le categorie di sottosuolo B, C, D, ed E i coefficienti  $S_s$  e  $C_C$  possono essere calcolati, in funzione dei valori di  $F_0$  e  $T_C^*$  relativi al sottosuolo di categoria A, mediante le espressioni fornite nella tabella 3.2.V, nelle quali  $g$  è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Per il comune di Milano, caratterizzato da sottosuolo di categoria C, si applicano le seguenti espressioni:

$$S_s = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot a_g/g \leq 1.50$$

$$C_C = 1.05 \cdot (T_C^*)^{-0.33}$$

#### Amplificazione topografica

Per tener conto delle condizioni topografiche ed in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $S_T$  riportati in tabella 3.2.VI, in funzione delle categorie topografiche.

Per il comune di Milano, caratterizzato da topografia di categoria T1, si applica il seguente coefficiente di amplificazione topografica:

$$S_T = 1.0.$$

#### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali

Nell'area di studio (stazione di S. Cristoforo), in fase progettuale occorre definire puntualmente le azioni sismiche come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici del reticolo di riferimento contenenti l'area di studio, adottando come pesi gli inversi delle distanze dal punto di studio ai vertici considerati. Preventivamente è necessario definire le caratteristiche progettuali della struttura da realizzare (come sopra riportato): il tipo di opera, la sua vita nominale, la sua classe d'uso, il suo coefficiente d'uso, la sua vita di riferimento, ecc.; tutto lo studio dell'azione sismica si fa sulle caratteristiche progettuali.

Utilizzando il software denominato **Spettri-NTCver.1.0.3** (scaricabile gratuitamente dal sito del Ministero delle Infrastrutture) è possibile determinare l'azione sismica di progetto per qualsiasi punto del territorio nazionale, inserendo le coordinate del punto di studio e le caratteristiche di risposta sismica locale; si può visionare lo spettro di progetto (componente orizzontale e componente verticale), lo spettro elastico di riferimento ed i parametri che permettono di definirlo.

Di seguito si riportano alcuni grafici e tabelle tratti da detto software, calcolati per la stazione di S. Cristoforo, ipotizzando: categoria di sottosuolo C, categoria topografica T1 (e corrispondente coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  pari a 1), per opere strutturali di tipo 2, aventi vita nominale  $V_N \geq 50$  anni e coefficiente d'uso della

costruzione  $C_u$  pari a 1.5 (corrispondente alla classe d'uso III). Si ricorda che in fase progettuale tutte queste ipotesi andranno verificate e tarate sul progetto definitivo.

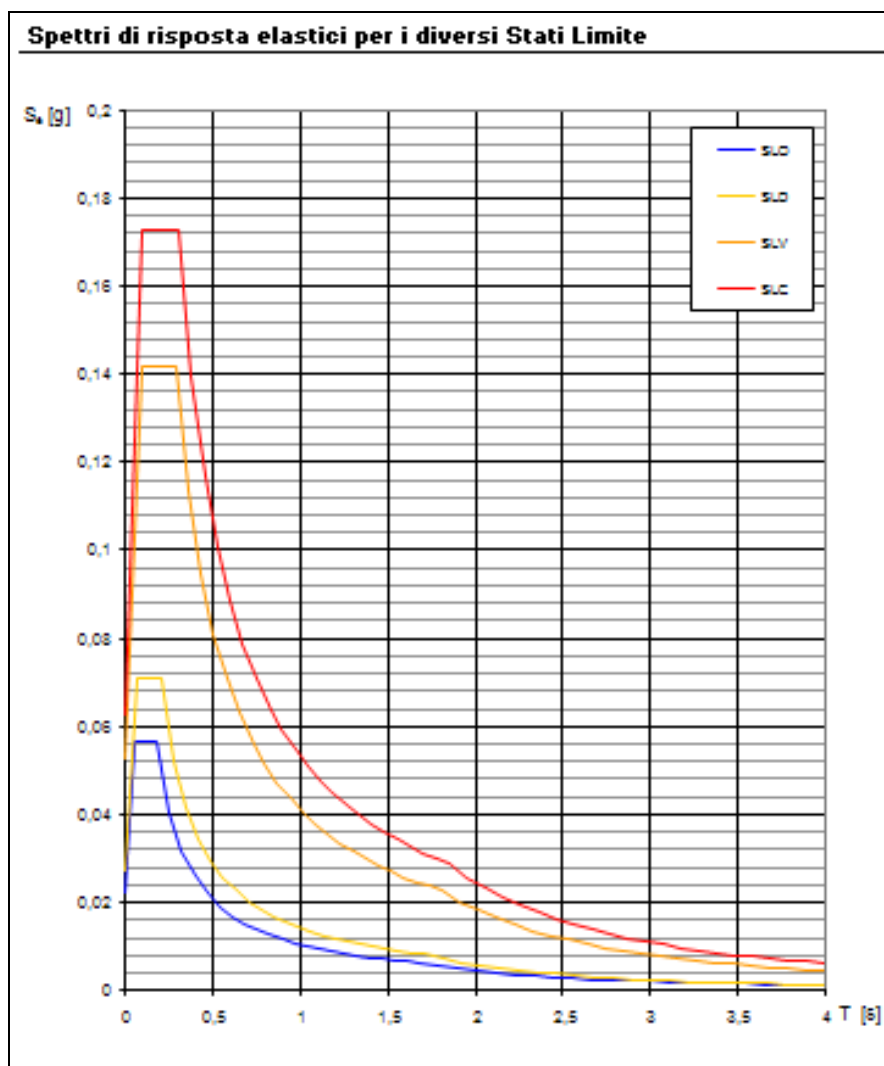


Fig 5.4

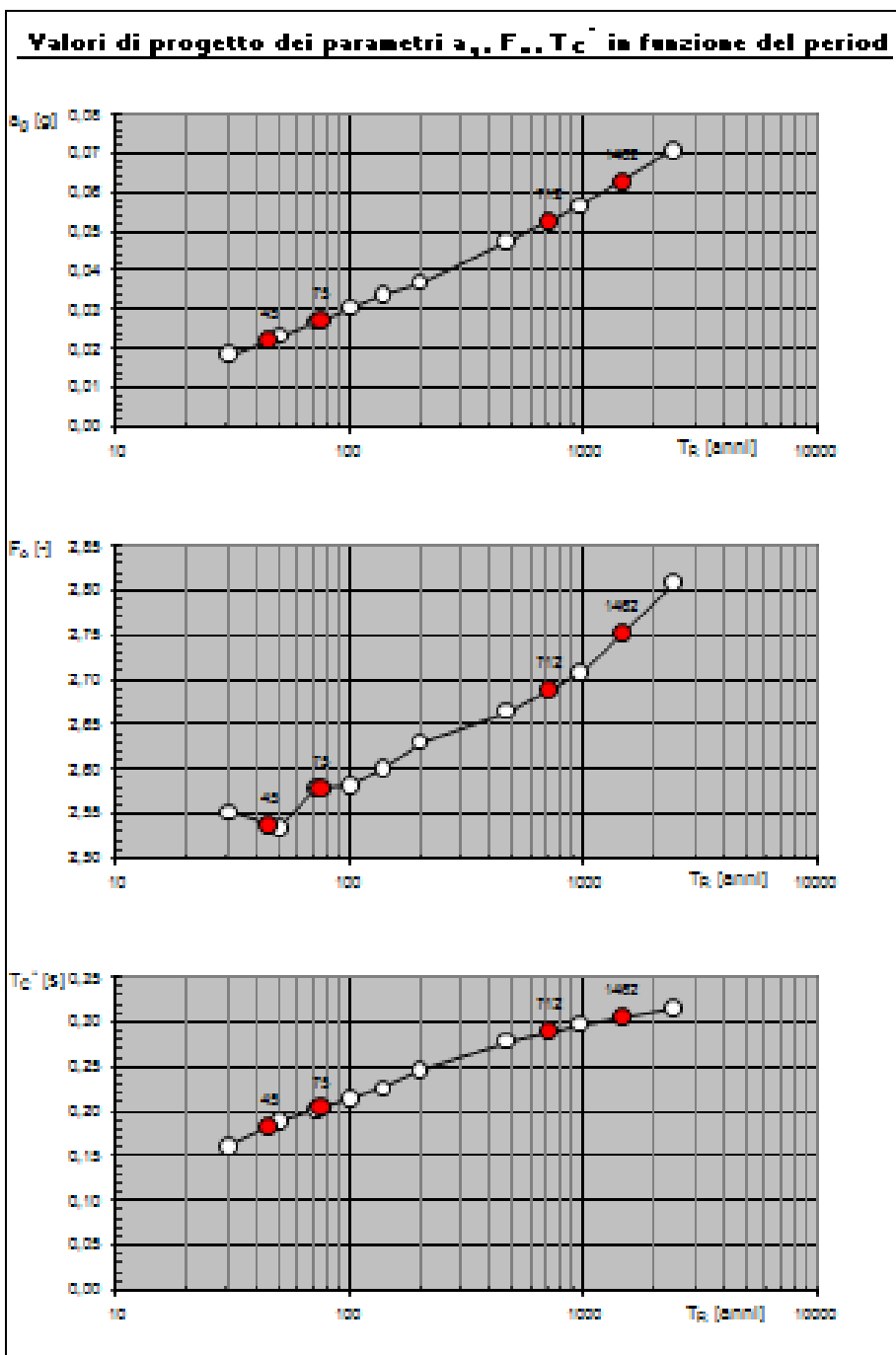


Fig 5.5

Di seguito si riportano, in maniera indicativa, i grafici degli spettri di risposta, calcolati per categoria di sottosuolo C, categoria topografica T1 e  $S_T$  pari a 1, per edifici con  $V_N \geq 50$  anni,  $C_u$  pari a 1.5 (classe d'uso III):

- ✓ per probabilità di superamento del 10% cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente nello stato limite (ultimo) di salvaguardia della vita SLV (come riportato nella tabella 3.2.I del D.M. 14/01/08)
- ✓ per probabilità di superamento del 63% cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente nello stato limite (di esercizio) di danno SLD (come riportato nella tabella 3.2.I del D.M. 14/01/08)

riferiti ad uno smorzamento convenzionale  $\xi$  del 5% (quindi con fattore  $\eta$  pari a 1) e fattore  $q_0$  pari a 3.

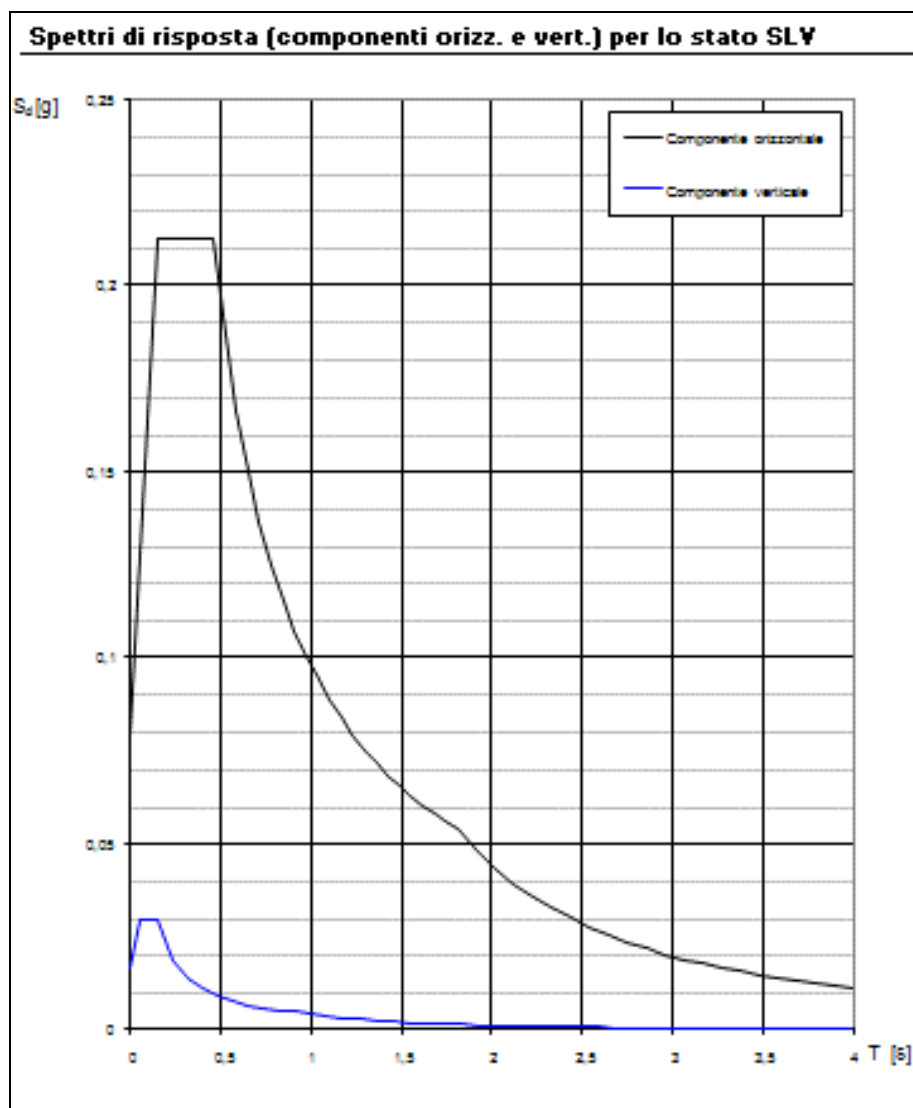


Fig 5.6

Per azione sismica agente nello SLV (con probabilità di superamento del 10% in 50 anni - periodo di ritorno pari a 712 anni) quindi si avrà:

$a_g$	$F_0$	$T_c^*$	$S_s$	$C_c$	$S_r$	$q$
0.053 g	2.691	0.291 s	1.500	1.577	1.000	1.000

$S$	$\eta$	$T_B$	$T_C$	$T_D$
1.500	1.000	0.153 s	0.460 s	1.811 s

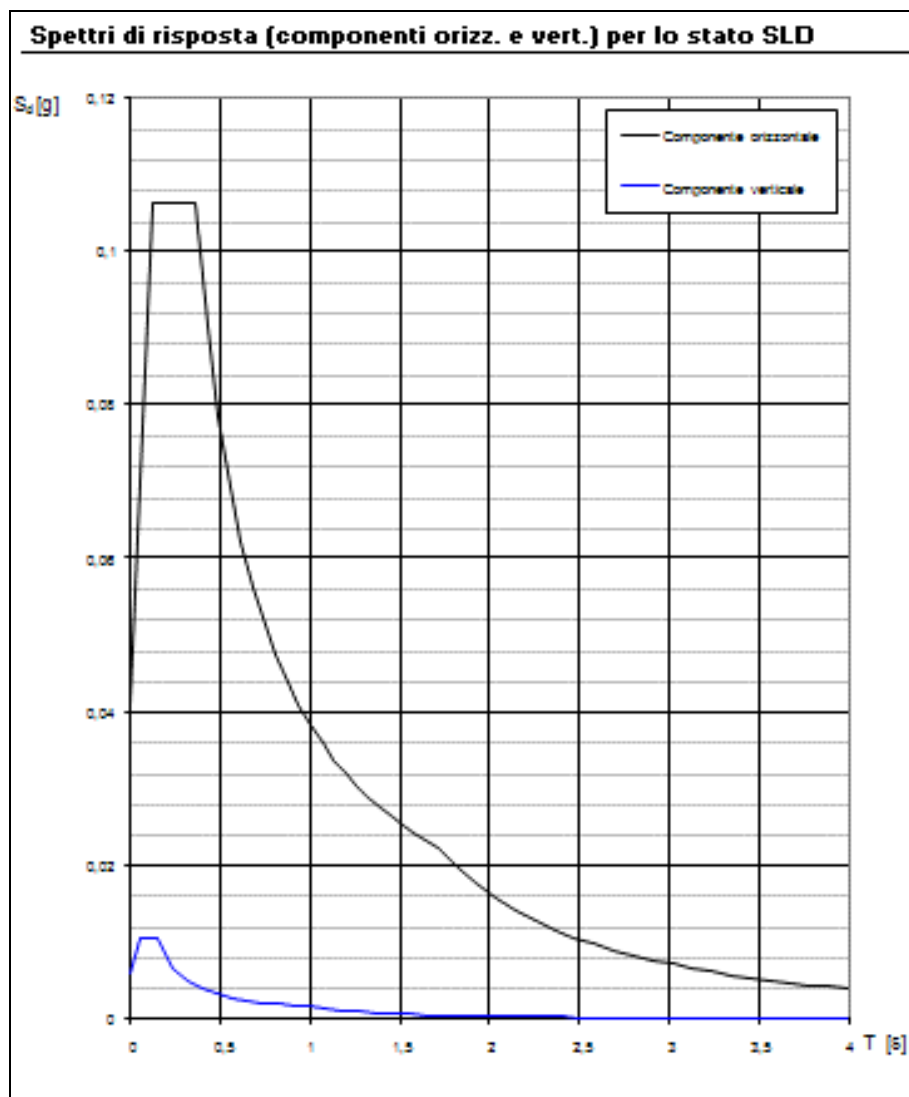


Fig 5.7

Per azione sismica agente nello SLD (con probabilità di superamento del 63% in 50 anni - periodo di ritorno pari a 75 anni) quindi si avrà:

$\alpha_g$	$F_0$	$T_c^*$	$S_s$	$C_c$	$S_r$	$q$
0.027 g	2.580	0.204 s	1.500	1.774	1.000	1.000

$S$	$\eta$	$T_B$	$T_C$	$T_D$
1.500	1.000	0.121 s	0.362 s	1.710 s

Per gli stati limite di esercizio si utilizza l'analisi lineare per sistemi non dissipativi, gli effetti delle azioni sismiche sono calcolati, quale che sia la modellazione per esse utilizzata, riferendosi allo spettro di progetto ottenuto assumendo un fattore di struttura  $q$  unitario.



Per gli stati limite ultimi si utilizza l'analisi lineare per sistemi dissipativi, gli effetti delle azioni sismiche sono calcolati riferendosi allo spettro di progetto ottenuto assumendo un fattore di struttura  $q$  maggiore dell'unità. Il valore del fattore di struttura  $q$  da utilizzare per ciascuna direzione della azione sismica, dipende dalla tipologia strutturale, dal suo grado di iperstaticità e dai criteri di progettazione adottati e prende in conto le non linearità di materiale. Esso può essere calcolato tramite la seguente espressione:

$$q = q_0 \cdot K_R$$

dove:

$q_0$  è il valore massimo del fattore di struttura che dipende dal livello di duttilità attesa, dalla tipologia strutturale e dal rapporto  $au/a1$  tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione;

$K_R$  è un fattore riduttivo che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

## 5.2 Normativa regionale

### D.G.R. n. 14964 del 7 novembre 2003

La Regione Lombardia con D.G.R. n. 14964 del 7/11/03 prende atto della classificazione fornita in prima applicazione dalla citata ordinanza 3274/03 ed impone l'obbligo della progettazione antisismica per i comuni che ricadono in zona 2, zona 3 ed in zona 4 esclusivamente per gli edifici strategici e rilevanti, così come individuati dal D.D.U.O. n. 19904 del 21/11/03.

### D.G.R. n. 8/7374 del 28 maggio 2008

Per l'analisi della pericolosità sismica dell'area di studio si è fatto riferimento all'Allegato 5 (*Analisi e valutazione degli effetti sismici di sito in Lombardia finalizzate alla definizione dell'aspetto sismico nei Piani di Governo del Territorio*) della D.G.R. n. 8/7374 del 28/05/08 pubblicata sul Bollettino Ufficiale del 12/06/08 2° Supplemento Straordinario: *Aggiornamento dei "Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12", approvati con d.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566.*

Tale allegato illustra la metodologia per la valutazione dell'amplificazione sismica locale che prevede tre livelli di approfondimento, di seguito sintetizzati:

- 1° livello, riconoscimento delle aree passibili di amplificazione sismica sulla base sia di osservazioni geologiche sia di dati esistenti
- 2° livello, caratterizzazione semiquantitativa degli effetti di amplificazione attesi negli scenari perimettrati nella carta di pericolosità sismica locale, che fornisce la stima di risposta sismica nei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione ( $F_a$ )
- 3° livello, definizione degli effetti di amplificazione tramite indagini e analisi più approfondite.

Il primo livello è obbligatorio per tutti i comuni.

Prevede l'assegnazione dello scenario di pericolosità sismica locale (PSL) del territorio in base alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geotecniche, secondo quanto riportato nella Tabella 1 dell'Allegato 5 alla D.G.R. n. 8/7374 del 28/05/08, tramite la redazione della *Carta della pericolosità sismica locale*.

In riferimento alle diverse situazioni tipo, riportate nella suddetta tabella, in grado di determinare gli effetti sismici locali (aree a pericolosità sismica locale – PSL) si effettua l'assegnazione diretta della classe di pericolosità e conseguentemente dei successivi livelli di approfondimento necessari.

Il secondo livello è obbligatorio in fase pianificatoria:

- per i comuni ricadenti in zona sismica 4, negli scenari PSL Z3 e Z4 nel caso di costruzioni strategiche e rilevanti di cui al D.D.U.O. n. 19904 del 21/11/03;
- per i comuni ricadenti in zona sismica 2 o 3, negli scenari PSL suscettibili di amplificazioni sismiche morfologiche e litologiche (zone Z3 e Z4) se interferenti con l'urbanizzato e/o con le aree di espansione urbanistica.

Il terzo livello è obbligatorio in fase progettuale:

- nelle aree indagate con il 2° livello quando  $F_a$  calcolato risulta  $>$  del valore di soglia comunale;
- per i comuni ricadenti in zona sismica 4, negli scenari PSL Z1 e Z2 nel caso di costruzioni strategiche e rilevanti di cui al D.D.U.O. n. 19904 del 21/11/03;
- per i comuni ricadenti in zona sismica 2 o 3, negli scenari PSL caratterizzati da effetti di instabilità (Z1), cedimenti e/o liquefazione (Z2);
- per costruzioni il cui uso prevede affollamenti significativi, industrie con attività pericolose per l'ambiente, reti viarie e ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza e costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, sociali essenziali.

Dovranno essere progettati adottando criteri antisismici di cui al D.M. 14 gennaio 2008, definendo le azioni sismiche di progetto a mezzo di analisi di approfondimento di 3° livello tutte le strutture cui all'Allegato A (*Elenco degli edifici e delle opere di competenza regionale*) del D.D.U.O. 19904 del 21 novembre 2003 *Approvazione elenco tipologie degli edifici e opere infrastrutturali e programma temporale delle verifiche di cui all'art. 2, commi 3 e 4 dell'ordinanza p.c.m. n. 3274 del 20 marzo, in attuazione della d.g.r. n. 14964 del 7 novembre 2003*, ovvero edifici ed opere infrastrutturali di interesse strategico di competenza regionale la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile (punto 1. Edifici ed opere strategiche), edifici ed opere infrastrutturali di competenza regionale che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso (punto 2. Edifici ed opere rilevanti).

### 1° livello

L'area della stazione di S. Cristoforo ricade all'interno dello scenario PSL **Z4a**, cioè *Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi*, scenario che potrebbe causare amplificazioni litologiche e geometriche.

Per definire la zona sismica dell'area di studio è necessario riferirsi alla Deliberaz. Giunta della Regione Lombardia n. 7/14964 del 7/11/2003 (pubblicata sul B.U.R.L. Serie Ordinaria n. 48 del 24/11/03) e consultare l'elenco riportato nell'Allegato A; l'area

della stazione di S. Cristoforo, come tutto il territorio comunale di Milano, ricade in zona sismica 4, pertanto:

- se non interessata dalla progettazione di edifici strategici o rilevanti, non necessita di approfondimento di 2° livello: in fase progettuale è possibile applicare lo spettro previsto dalla normativa per la categoria di suolo individuata (C)
- se interessata dalla progettazione di costruzioni strategiche e rilevanti di cui al D.D.U.O. n. 19904 del 21/11/03 necessita di approfondimento di 2° livello in fase pianificatoria.

## **2° livello**

Nel caso in esame, l'approfondimento di 2° livello consiste nella valutazione delle amplificazioni litologiche e morfologiche del sito.

Si tratta quindi di fornire una caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi nell'area, fornendo la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di fattore di amplificazione ( $F_a$ ). Il valore di  $F_a$  viene calcolato in due intervalli di periodo diversi che sono stati scelti in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie presenti più frequentemente nel territorio regionale: tra 0.1-0.5 s per strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e 0.5-1.5 s per strutture più alte e più flessibili. Il parametro è stato calcolato per ciascun Comune della Regione Lombardia, valido per ciascuna zona sismica (zona 2, 3 e 4), per le diverse categorie di suolo soggette ad amplificazioni litologiche (B, C, D, ed E) e per i due intervalli di periodo considerati (banca dati in formato excel: **soglie\_lomb.xls**).

Per l'analisi degli effetti sismici di sito, nel caso l'area di studio necessiti di approfondimento di 2° livello, sono stati utilizzati dati derivanti da indagini geognostiche (prove penetrometriche dinamiche e sondaggi a carotaggio continuo) eseguite su tutto il territorio comunale. Sulla base dei dati geotecnici raccolti è stato delineato un modello geologico-tecnico utile alla definizione del periodo proprio del sito ( $T$ ) calcolato tramite la procedura semplificata riportata nel capitolo 2.2 dell'Allegato 5 alla D.G.R. n. 8/1566 del 22/12/05.

Il periodo  $T$  viene calcolato utilizzando la seguente equazione:

$$T = 4 \cdot \sum h_i / (\sum (V_s \cdot h_i) / \sum h_i)$$

dove

$V_s$  velocità delle onde S nello strato  $i$ -esimo

$h_i$  spessore dello strato  $i$ -esimo

Per il calcolo del periodo il sottosuolo del comune di Milano è stato schematizzato come segue:

- strato superficiale costituito da terreno poco addensato fino alla profondità di circa 6 m da p.c. (considerando la presenza di materiale di riporto nei primi metri di sottosuolo)
- strato profondo costituito da terreno con addensamento discreto che migliora con l'aumentare della profondità (considerando la presenza di terreno naturale sabbioso ghiaioso).

Per il calcolo della velocità di propagazione delle onde S nei due strati considerati è stata utilizzata la formula di Ohta & Goto:

$$V_s = C_s \cdot N_{spt}^{0.171} \cdot Z^{0.199} \cdot F_a \cdot F_g$$

dove

$C_s$  costante empirica (= 67.3)

Nspt	numero di colpi necessario per ottenere avanzamento di 30 cm in una prova SPT
Z	profondità di misura (m)
F,	fattore dipendente dall'età geologica del deposito
Fg	fattore dipendente dalla granulometria del deposito

Per la stima degli effetti litologici è stata utilizzata come scheda di valutazione di riferimento quella riguardante la litologia sabbiosa; la validità della scheda è stata inoltre verificata anche in base all'andamento dei valori di  $V_s$  con la profondità.

All'interno della scheda è stata scelta, in funzione della profondità e della velocità  $V_s$  dello strato superficiale, utilizzando la matrice della scheda di valutazione, la curva più appropriata per rappresentare il sottosuolo comunale: curva 3 (colore blu).

Pertanto  $F_a$  è stato calcolato utilizzando le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} \text{per } 0,03 \leq T \leq 0,45 & \quad F_{a \ 0,1-0,5} = -9,68 T^2 + 4,77 T + 0,86 \\ \text{per } 0,08 \leq T \leq 0,80 & \quad F_{a \ 0,5-1,5} = -6,11 T^3 + 5,79 T^2 + 0,44 T + 0,93 \end{aligned}$$

I valori massimi di  $F_a$  (approssimati alla prima cifra decimale, utilizzando una variabilità di  $\pm 0.1$ ) calcolati tramite la scheda di valutazione, sono stati confrontati con i corrispondenti valori soglia calcolati per il comune di Milano (dedotti da **soglie\_lomb.xls**), relativi al suolo di fondazione di tipo C e per gli intervalli di periodo 0.1-0.5 s (struttura bassa e rigida) e 0.5-1.5 s (struttura alta e flessibile):

$$\begin{aligned} F_{a \ (0,1-0,5 \ s)} &= 1.2 (\pm 0.1) < F_{a \ (0,1-0,5 \ s)} = 1.4 \\ F_{a \ (0,5-1,5 \ s)} &= 1.6 (\pm 0.1) < F_{a \ (0,5-1,5 \ s)} = 2.3 \end{aligned}$$

Il valore di  $F_a$  (sia per periodo 0.1-0.5 s che per periodo 0.5-1.5 s) risulta inferiore al valore soglia comunale: la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica e/o morfologica locale; pertanto in fase progettuale è possibile applicare lo spettro previsto dalla normativa per la categoria di suolo individuata (categoria C).

Nelle aree in cui  $F_a$  calcolato risulta superiore a  $F_a$  di soglia comunale (dedotto da **soglie\_lomb.xls**), si dovrà procedere alle analisi di 3° livello o in alternativa, utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore (categoria D).

### **3° livello**

In fase progettuale per costruzioni il cui uso prevede affollamenti significativi, edifici industriali con attività pericolose per l'ambiente, reti viarie e ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza e costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti e con funzioni sociali essenziali di cui al D.D.U.O. n. 19904 del 21/11/03, è necessario effettuare l'analisi di 3° livello (e di conseguenza applicare gli spettri calcolati).